



**SECCIÓN DE POSTGRADO Y TÍTULOS PROPIOS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

Proyecto Fin de Periodo Formativo Doctorado

# **SIMULACIÓN DEL FLUJO ALREDEDOR DE PANELES FOTOVOLTAICOS. DETERMINACIÓN DE CARGAS AERODINÁMICAS.**

Autor: Francisco Javier Llanos López

Director: Dr. José Pérez García

**Cartagena, Octubre de 2013**

## **ÍNDICE DE CONTENIDOS**

1.	Introducción.....	6
1.1.	Antecedentes.....	6
1.2.	Objeto .....	8
1.3.	Recursos disponibles y fases del trabajo .....	8
1.3.1.	Documentación y búsqueda bibliográfica .....	8
1.3.2.	Creación de mallas .....	8
1.3.3.	Preparación de los casos.....	8
1.3.4.	Ejecución de los casos.....	8
1.3.5.	Recogida y tratamiento de resultados.....	8
1.3.6.	Conclusiones y redacción del presente trabajo.....	8
2.	Planteamiento del problema .....	10
2.1.	Modelo a estudiar .....	10
2.1.1.	Mallado en 2D.....	10
2.1.2.	Mallado en 3D.....	10
2.1.3.	Mallado en 3D con viento cruzado.....	11
3.	Modelo matemático.....	12
3.1.	Metodología empleada en la realización de simulaciones.....	12
3.1.1.	Etapas principales.....	12
3.1.2.	Discretización .....	12
3.1.3.	Discretización de las ecuaciones del flujo.....	12
3.1.3.1.	Método de los volúmenes finitos .....	12
3.1.4.	Resolución de las ecuaciones discretizadas.....	13
3.1.5.	Dependencia del tiempo y no linealidad .....	13
3.1.6.	Condiciones de contorno .....	14
3.1.7.	Ecuaciones fundamentales .....	14
3.1.8.	Modelo k- $\epsilon$ .....	16
3.1.9.	FLUENT: modelo segregado y modelo acoplado .....	16
3.2.	Análisis dimensional. Coeficientes adimensionales.....	18
3.2.1.	Coeficiente de resistencia.....	19
3.3.	Criterio de signos .....	20
3.3.1.	Fuerzas.....	20
3.3.2.	Momentos de giro.....	20
4.	Validación del modelo numérico .....	23
4.1.	Revisión bibliográfica.....	23

4.2.	Normativas.....	28
4.3.	Definición de la geometría en GAMBIT .....	33
4.3.1.	Dominio computacional .....	33
4.3.2.	Sensibilidad de la malla.....	33
4.3.3.	Casos en 2D.....	34
4.3.4.	Casos en 3D. Viento frontal .....	36
4.3.5.	Casos en 3D. Viento cruzado .....	38
4.4.	Hipótesis de simulación en FLUENT. Condiciones de contorno y modelo de turbulencia. ....	38
4.4.1.	Solver.....	38
4.4.2.	Viscous model .....	39
4.4.3.	Operating Conditions .....	39
4.4.4.	Condiciones de contorno .....	39
4.4.5.	Control de la solución.....	39
4.5.	Procesado de resultados .....	39
4.6.	Tratamiento de resultados.....	40
5.	Casos de estudio .....	41
5.1.	Simulaciones en 2D .....	41
5.1.1.	Coeficiente de resistencia.....	41
5.2.	Simulaciones en 3D con viento frontal.....	44
5.2.1.	Coeficiente de resistencia.....	44
5.2.2.	Estudio de la primera fila de paneles. Coeficiente de resistencia .....	47
5.2.3.	Campo de presiones.....	51
5.2.4.	Campo de velocidades.....	53
5.3.	Simulaciones en 3D con viento cruzado.....	55
5.3.1.	Coeficiente de resistencia.....	56
5.3.2.	Campo de presiones.....	58
5.3.3.	Campo de velocidades.....	58
6.	Conclusiones .....	59
7.	Líneas de trabajo futuras .....	60
8.	Referencias bibliográficas .....	62

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Configuración típica de un huerto solar con el sistema SA 60.....	6
Figura 2. Vista en planta y alzado de una distribución de huerto solar, con paneles en horizontal, empleando el sistema SA 60. ....	7
Figura 3. Características técnicas del sistema SA 60.....	7
Figura 4. Variables para simulaciones en 2D.....	10
Figura 5. Variables para simulaciones 3D.....	10
Figura 6. Variables para simulaciones 3D con viento cruzado.....	11
Figura 7. Representación de una celda y sus dos aledañas (2D).....	12
Figura 8. Visualización del área real frente al área proyectada.....	19
Figura 9. Representación de la fuerzas horizontal y vertical producidas por el viento incidente.....	20
Figura 10. Representación de la fuerza global F (casos en 2D).....	20
Figura 11. Criterio de signos para definir el momento de giro y el punto de aplicación de la fuerza resultante para un panel con ángulo positivo. ....	21
Figura 12. Criterio de signos para definir el momento de giro y el punto de aplicación de la fuerza resultante para un panel con ángulo nulo ( $0^\circ$ ).....	21
Figura 13. Criterio de signos para definir el momento de giro y el punto de aplicación de la fuerza resultante para un panel con ángulo negativo. ....	21
Figura 14. Coeficiente de resistencia para placa plana paralela al flujo.....	24
Figura 15. Coeficiente de resistencia en cuerpos bi y tridimensionales. [1].....	24
Figura 16. $C_f$ de una placa rectangular en función de su ratio de aspecto [5].....	25
Figura 17. $C_N$ para dos placas idénticas planas paralelas y perpendiculares al flujo [3]. ....	26
Figura 18. Coeficiente de resistencia en placas planas frontales al flujo para diferentes ángulos de ataque sin presencia de paredes próximas [4].....	27
Figura 19. Coeficiente de resistencia total en función del ángulo de ataque. ( $\lambda = bL = 3.0$ ) [6].....	27
Figura 20. $C_d$ y $C_l$ típico de placa plana en función del ángulo de ataque.....	28
Figura 21. Presión dinámica del viento.....	29
Figura 22. Relación entre la velocidad del viento y el $C_f$ con una carga de $2873 \text{ N/m}^2$ .....	30
Figura 23. Malla y panel fotovoltaico. ....	33
Figura 24. Detalle de la malla empleada en el estudio de validación.....	33
Figura 25. Estudio de sensibilidad de malla.....	34
Figura 26. Detalle de un panel en 2D y su óvalo.....	34
Figura 27. Detalle de un panel en 2D y su óvalo, mallado.....	35
Figura 28. Detalle de la malla tras ser refinada.....	35
Figura 29. Dominio computacional completo en 2D.....	35
Figura 30. Dominio computacional mallado y sin mallar.....	36
Figura 31. Perfil de 5 paneles.....	36
Figura 32. Detalle de un panel y del mallado inicial en su entorno. ....	37
Figura 33. Situación de paneles en simulaciones 3D con viento frontal (simetría). ....	37
Figura 34. Perfil y alzado de los paneles de la Figura 33.....	38
Figura 35. Vista en planta del dominio computacional para viento cruzado. ....	38
Figura 36. $C_f$ según ángulo de ataque. Viento de $20 \text{ m/s}$ . Separación de $9 \text{ m}$ .....	42
Figura 37. $C_f$ según ángulo de ataque. Viento de $20 \text{ m/s}$ . Separación de $12 \text{ m}$ .....	42
Figura 38. $C_f$ según ángulo de ataque. Viento de $42 \text{ m/s}$ . Separación de $9 \text{ m}$ .....	43
Figura 39. $C_f$ según ángulo de ataque. Viento de $42 \text{ m/s}$ . Separación de $12 \text{ m}$ .....	43
Figura 40. Situación de los paneles y numeración de estos. ....	44
Figura 41. $C_f$ . Viento de $42 \text{ m/s}$ y separación entre paneles de $9 \text{ m}$ . ....	45

Figura 42. Cf. Viento de 42m/s y separación entre paneles de 12m. ....	46
Figura 43. Cf en la primera fila. Separación de 9m. ....	48
Figura 44. Cf en la primera fila. Separación de 12m. ....	49
Figura 45. Trayectoria de algunas partículas a su paso por la primera fila de paneles. Se muestra sólo media fila de paneles al haber un plano de simetría en $Z=0$ .....	50
Figura 46. Campo de presiones. Detalle de la primera fila en el panel central. Distancia entre filas 9m. Ángulo de ataque $+60^\circ$ . $v=42\text{m/s}$ . ....	51
Figura 47. Campo de presiones. Detalle de la primera fila, oquedad entre paneles. Distancia entre filas 9m. Ángulo de ataque $+60^\circ$ . $v=42\text{m/s}$ . ....	51
Figura 48. Campo de presiones. Detalle de la segunda fila, panel central. Distancia entre filas 9m. Ángulo de ataque $+60^\circ$ . $v=42\text{m/s}$ .....	52
Figura 49. Campo de presiones. Detalle de la segunda fila, oquedad entre paneles. Distancia entre filas 9m. Ángulo de ataque $+60^\circ$ . $v=42\text{m/s}$ .....	52
Figura 50. Campo vectorial de velocidades. Primera fila, panel central. Separación entre filas de 9m. Ángulo de ataque $+60^\circ$ . $v=42\text{m/s}$ . ....	53
Figura 51. Campo vectorial de velocidad. Segunda fila, panel central. Separación entre filas de 9m. Ángulo de ataque de $+60^\circ$ . $v=42\text{m/s}$ . ....	53
Figura 52. Campo de velocidades en la dirección X. Paneles centrales. Separación entre filas de 9m. Ángulo de ataque de $+60^\circ$ . $v=42\text{m/s}$ . Se han señalado (en negro) las 3 primeras filas de paneles. ....	54
Figura 53. Intensidad turbulenta (%).....	54
Figura 54. Disposición de los paneles con viento cruzado.....	55
Figura 55. Numeración de los paneles (fila1) y ángulo de referencia. Simulaciones con viento cruzado. ....	55
Figura 56. Valor de Cf en la primera fila. Viento frontal ( $0^\circ$ ) y cruzado ( $45^\circ$ y $55^\circ$ ).....	57
Figura 57. Campo de presiones. Viento cruzado a $45^\circ$ y 42m/s. Separación entre filas de 9m. Paneles a $+60^\circ$ . Vista en planta. ....	58
Figura 58. Viento cruzado a $45^\circ$ y 42m/s. Separación entre filas de 9m. Paneles a $+60^\circ$ . Vista en planta. ....	59

## **NOMENCLATURA**

$p$	presión
$V$	volumen
$\rho$	densidad
$U$	velocidad
$k$	conductividad térmica
$F$	fuerza
$M$	Momento de giro
$C_f$	coeficiente de resistencia
$h$	coeficiente convectivo
$A$	Área
$Re$	número adimensional de Reynolds

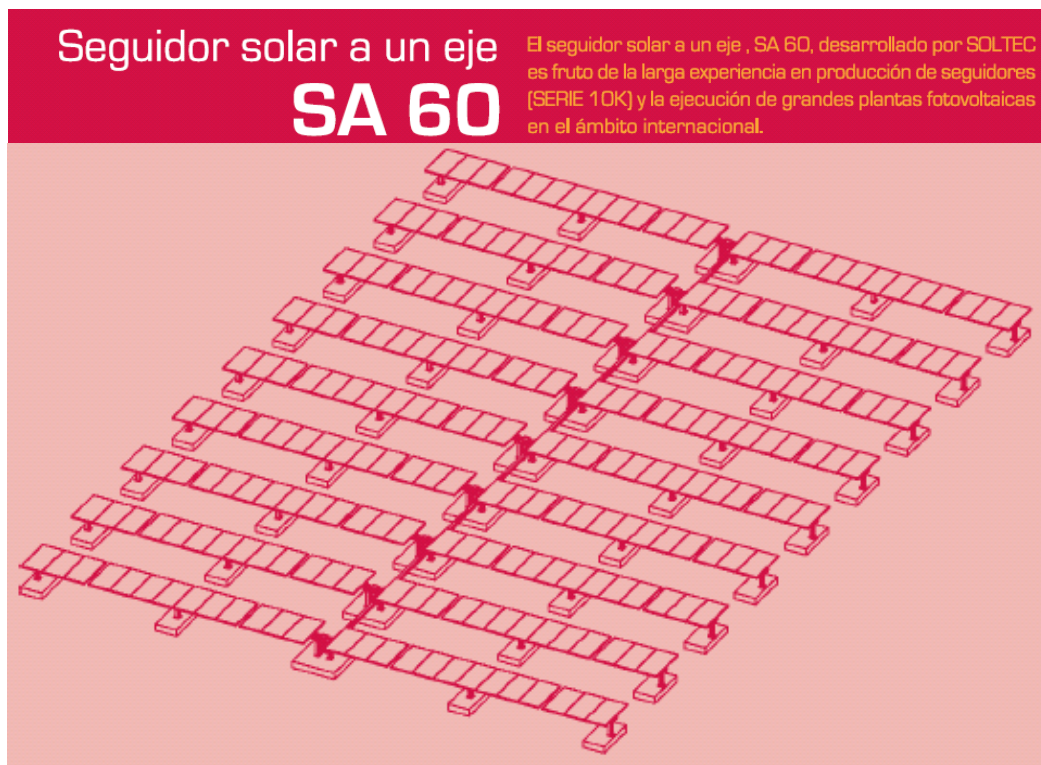
## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

Como referencia se tomó el modelo de seguidor solar a un eje SA 60 y se estudió su comportamiento con simulaciones en 2 dimensiones y 3 dimensiones.

Dicho seguidor solar se compone de una cantidad variable de filas, según la potencia instalada. Cada fila está formada por 2 ramales con 13 paneles en cada ramal, y conectados a un seguidor de un eje, tal como se aprecia en la **Figura 1**.

Este sistema orienta todos los paneles con el mismo ángulo de acuerdo a la posición cenital del sol. Los requerimientos iniciales de superficie son de 2Ha/MWp de potencia instalada.



**Figura 1. Configuración típica de un huerto solar con el sistema SA 60**

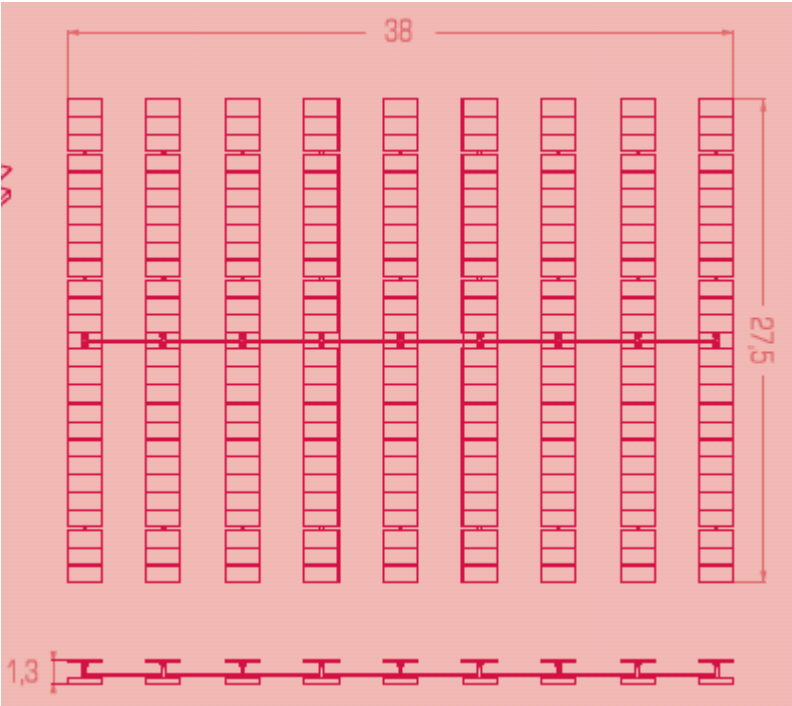


Figura 2. Vista en planta y alzado de una distribución de huerto solar, con paneles en horizontal, empleando el sistema SA 60.

Seguidor Solar SA 60		
Potencia pico seguidor	63-65 kWp	
Ocupación del terreno	2 ha/MWp aprox.	
Módulos fotovoltaicos	234 x	Suntech Power STP 270/280 SOLTEC P 270/280
Inversor trifásico	6 x SOLTEC TT10000	
Seguimiento	Eje horizontal NS, según cálculos astronómicos	
Accionamiento	Piñon-cadena accionado por motor eléctrico	
Comunicación	RS485 a sistema SCADA con conexión Internet	
Retroseguimiento	Sí	
Resistencia al viento	Hasta 150 km/h Superando norma EN-1991-1-4 para toda Europa	
Medidas	Dirección NS=38 m ; Dirección EO=27.5 m	
Peso	15 t aprox.	
Cimentación	Superficial, de hormigón armado	
Altura máxima	2 m	

Figura 3. Características técnicas del sistema SA 60



## 1.2. Objeto

Se busca determinar las acciones del viento sobre esta distribución de paneles en un entorno abierto con diversas separaciones entre filas. Se pretende estudiar, mediante simulación numérica con Fluent, las fuerzas aerodinámicas soportadas por cada panel fotovoltaico. Se han realizado simulaciones 2D y 3D para determinar los coeficientes aerodinámicos en régimen estacionario para diferentes configuraciones del conjunto de paneles montados sobre un seguidor a 1 eje.

El estudio paramétrico incluye la variación del ángulo de inclinación de los paneles, la intensidad del viento, su dirección, y la separación entre filas de paneles.

## 1.3. Recursos disponibles y fases del trabajo

### 1.3.1.Documentación y búsqueda bibliográfica

En la fase de documentación se ha hecho uso de los recursos bibliográficos disponibles en la red en diversas bases de datos, publicaciones científicas de temática similar, así como ejemplares en papel de las bibliotecas de la Universidad Politécnica de Cartagena y de la Escuela Técnica Ciencias Aplicadas de Düsseldorf.

Toda la bibliografía figura al final de este documento.

### 1.3.2.Creación de mallas

La creación de las mallas se ha llevado a cabo con el software GAMBIT 2.4.6. En él se han dibujado todas las geometrías en 2D y 3D (paneles y límites del dominio computacional), y se han realizado los mallados.

### 1.3.3.Preparación de los casos

Una vez creadas las mallas se han cargado en FLUENT y se han definido todos los parámetros necesarios para la simulación, dejando los casos listos para ser calculados.

### 1.3.4.Ejecución de los casos

En primer lugar, algunos casos han sido ejecutados en un ordenador personal para probar y comprobar la correcta definición de las opciones.

A continuación se han llevado a cabo simulaciones a mayor escala haciendo uso del servidor de cálculo científico del Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica (SAIT) de la UPCT y de otro más pequeño perteneciente a FMDAuto (Universidad de Düsseldorf).

### 1.3.5.Recogida y tratamiento de resultados

Los archivos correspondientes a los casos ya calculados han sido abiertos con Fluent y, con el empleo de archivos auxiliares \*.jou (journal), se han extraído los resultados que se precisaban para cada panel en cada uno de los casos (fuerzas, momentos, etc.).

### 1.3.6.Conclusiones y redacción del presente trabajo

Con todo el material anteriormente desarrollado se han elaborado una serie de conclusiones que quedan plasmadas en la redacción del presente trabajo.

Para la realización de las simulaciones se ha empleado el siguiente software:

- GAMBIT 2.4.6: para la realización de mallas en 2 y 3 dimensiones
- ANSYS FLUENT 6.3.26: para el cálculo de las diversas mallas así como la obtención de resultados numéricos y campos de presiones, velocidades, etc.
- Matlab/Microsoft Excel: Tratamiento de resultados y generación de gráficos.

## 2. Planteamiento del problema

### 2.1. Modelo a estudiar

Basándose en la disposición de paneles anteriormente descrita, se ha realizado un dominio computacional con 5 filas de paneles con sus ejes posicionados a 1m del suelo.

#### 2.1.1. Mallado en 2D

Realizado con paneles de 2 metros de alto, 20cm de espesor y suponiendo un ancho de 1m. Se ha estudiado el comportamiento ante las siguientes variables:

Separación entre filas de paneles	9 m 12 m	
Velocidad del viento	20 m/s 25 m/s 30 m/s 42 m/s	
Ángulo de ataque	-60° -35° -10° 0°	+10° +35° +60°
Temperatura del aire	300 K	

Figura 4. Variables para simulaciones en 2D

#### 2.1.2. Mallado en 3D

Los casos se han simulado con las mismas variables que en 2D.

Separación entre filas de paneles	9 m 12 m	
Velocidad del viento	20 m/s 25 m/s 30 m/s 42 m/s	
Ángulo de ataque	-60° -35° -10° 0°	+10° +35° +60°
Temperatura del aire	300 K	

Figura 5. Variables para simulaciones 3D

### 2.1.3. Mallado en 3D con viento cruzado

Estas simulaciones son similares a las anteriores, pero se han realizado a una única temperatura y con dos ángulos de incidencia transversales

Separación entre filas de paneles	9 m 12 m	
Velocidad del viento	20 m/s 25 m/s 30 m/s 42 m/s	
Ángulo de ataque	-60° -35° -10° 0°	+10° +35° +60°
Temperatura del aire	300 K	
Ángulo de incidencia lateral	45° 55°	

**Figura 6. Variables para simulaciones 3D con viento cruzado**

### 3. Modelo matemático

#### 3.1. Metodología empleada en la realización de simulaciones

##### 3.1.1. Etapas principales

Los pasos a seguir para cualquier estudio realizado con CFD son los siguientes:

**Preproceso:** Definición de la geometría del caso de estudio. Se establecen también las condiciones de contorno, las condiciones iniciales y el modelo matemático a emplear.

**Simulación:** Mediante el programa FLUENT se resuelven por métodos iterativos las ecuaciones que definen el caso de estudio.

**Postproceso:** Etapa de análisis de datos, generación de representaciones de presiones, velocidad...

##### 3.1.2. Discretización

A partir del mallado FLUENT empleará el método de los volúmenes finitos para resolver el modelo matemático de ecuaciones. A diferencia de los métodos experimentales, CFD proporciona datos de presión velocidad, densidad, temperatura y otros.

##### 3.1.3. Discretización de las ecuaciones del flujo

Las complejas ecuaciones diferenciales son discretizadas numéricamente. Los métodos más comunes son: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos. Este último es el usado por FLUENT.

##### 3.1.3.1. *Método de los volúmenes finitos*

La ecuación de la cantidad de movimiento puede ser considerada como una serie de flujos dentro de un volumen de fluido, junto con un término de fuente que es el gradiente de presiones.

$$\mathbf{p} = \int \mathbf{v} \, d\mathbf{m} = \int_V \mathbf{v} \, \rho \, dV \quad (\text{Ec. 1})$$

En un volumen finito típico (Figura 7, en gris) hay un punto P en el que se quiere hallar el análogo numérico de la ecuación diferencial. Los puntos centrales de las celdas vecinas se denominan W y E (celda oeste y celda este). Las caras que delimitan la celda a un lado y a otro se denominan w y e (cara oeste y cara este, en rojo).

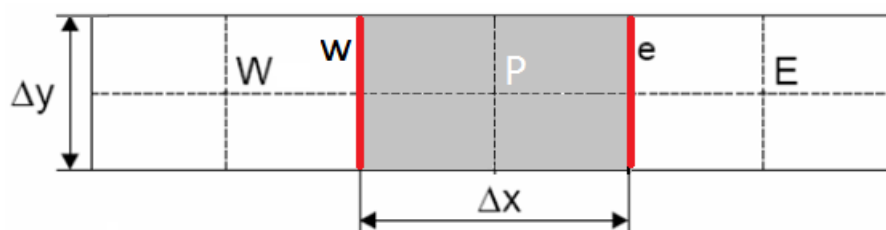


Figura 7. Representación de una celda y sus dos aledañas (2D)

Si se quisiera discretizar la derivada segunda siguiente:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

se debe hacer a partir de las derivadas primeras en las caras que limitan la celda:

$$\left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right)_p = \frac{\frac{\partial U}{\partial x_e} - \frac{\partial U}{\partial x_w}}{x_e - x_w} \quad (\text{Ec. 3})$$

Estas derivadas se calculan, a su vez, a partir de los valores de la variable U en los centros de las celdas vecinas:

$$\left( \frac{\partial U}{\partial x_e} \right) = \frac{U_e - U_p}{x_e - x_p} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\left( \frac{\partial U}{\partial x_w} \right) = \frac{U_p - U_w}{x_p - x_w} \quad (\text{Ec. 5})$$

De esta manera se puede hallar el análogo numérico de las ecuaciones diferenciales para cada volumen finito y, a continuación, resolver el sistema de ecuaciones algebraicas resultante.

#### 3.1.4. Resolución de las ecuaciones discretizadas

Una vez discretizadas las ecuaciones diferenciales, lo que se obtiene es un sistema de ecuaciones algebraicas, que se puede escribir en notación matricial de la manera:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (\text{Ec. 6})$$

donde  $\mathbf{A}$  es la matriz del sistema,  $\mathbf{b}$  es la columna de términos independientes, y  $\mathbf{x}$  es el vector incógnita. Estos sistemas de ecuaciones se resuelven con métodos directos o iterativos.

Los métodos directos buscan hallar la inversa de la matriz  $\mathbf{A}$ , descomponiendo la matriz A en el producto de dos matrices:  $\mathbf{L} \cdot \mathbf{U}$ , una triangular superior y la otra triangular inferior. Pero cuando la matriz es de grandes dimensiones estos métodos no son rentables computacionalmente hablando.

Por otro lado, los métodos iterativos tratan de hallar la solución partiendo de una solución aproximada y calculando, a partir de ella, una solución más aproximada, acercándose en cada iteración a la solución real. De este tipo son los métodos de Jacobi, Gauss-Seidel, TDMA (algoritmo de la matriz tridiagonal), SIP (procedimiento implícito de Stone), CGM (método del gradiente conjugado), etc. Cada uno de ellos con sus limitaciones y variantes.

#### 3.1.5. Dependencia del tiempo y no linealidad

Los métodos que se han comentado resuelven sistemas de ecuaciones lineales, con coeficientes constantes, y no se pueden usar directamente para resolver las ecuaciones de flujo no lineales. Además, variables como la velocidad y la presión del fluido pueden depender del tiempo, por lo

que hay que resolver todo el sistema para cada instante de tiempo. Por tanto, se ha de discretizar el tiempo y resolver el sistema para cada paso temporal.

Se linealizan las ecuaciones, se discretiza la derivada y se usa el valor de la velocidad existente en la celda de que se trate. La ecuación:

$$u \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)$$

se convierte en

$$\bar{u} \frac{u_{i+1,j} - U_{i-1,j}}{2\delta x} \quad (\text{Ec. 7})$$

Así se puede resolver iterativamente el sistema lineal de ecuaciones. Posteriormente, habrá que incrementar el paso temporal y resolver el sistema para un nuevo instante de tiempo si el problema no es estacionario.

### 3.1.6. Condiciones de contorno

La solución de un problema depende de las condiciones iniciales y de las condiciones de contorno a las que está sometido el fluido. Las condiciones de contorno más habituales que suelen aparecer en los problemas resueltos con CFD son la presión en un determinado contorno y la velocidad. Si interviene la ecuación de la energía también hay que concretar condiciones de contorno para la temperatura.

Las paredes solidas son condiciones de contorno especialmente críticas por el comportamiento del fluido en las proximidades de la misma. La simulación directa de la capa limite es extremadamente difícil y requiere unos recursos desproporcionados, por lo que se suelen utilizar modelos específicos.

### 3.1.7. Ecuaciones fundamentales

La dinámica de fluidos computacional (CFD), se basa en las ecuaciones fundamentales de continuidad, de momento y de energía. Las tres ecuaciones se basan en los tres principios físicos de todo fluido dinámico:

- Conservación de masa
- Ecuación de cantidad de movimiento
- Conservación de la energía

En la resolución mediante CFD se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes y balances de energía sobre volúmenes de control. Es decir, sobre pequeños volúmenes de control definidos dentro de la geometría del sistema, además de los modelos de turbulencia cuando son requeridos.

Las ecuaciones sirven para solucionar las iteraciones que realiza CFD del flujo de fluidos y los balances de energía. Estas ecuaciones están basadas en las ecuaciones de Navier-Stokes. Los balances son generalizados, el usuario puede decidir el numero de balances a solucionar según cuántos elementos se hayan definido en el sistema.

Los paquetes comerciales de CFD de ANSYS FLUENT resuelven para todos los flujos ecuaciones de Navier Stokes para la conservación de masa y del momento cuando hay flujo laminar sin transferencia de calor.

Para flujos en los que está presente compresibilidad o transferencia de calor, se resuelve una ecuación adicional de conservación de la energía.

Para flujos que implican mezcla de especies o reacciones, se resuelven ecuaciones de conservación de especies; si se emplea el modelo de combustión de no-premezcla, se resuelven ecuaciones de conservación para fracciones mixtas. Cuando el flujo es turbulento se resuelven ecuaciones adicionales de transporte.

En el presente trabajo se estudia un caso de flujo tridimensional y con transmisión de calor. Las ecuaciones que gobiernan dicho problema son las siguientes:

· *Ecuación de conservación de la masa*

La ecuación general de conservación de masa, o ecuación de continuidad, se puede definir como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (\text{Ec. 8})$$

El término  $S_m$  contiene la masa añadida por los cambios de fase. En general, en las simulaciones de este trabajo, este término es 0.

· *Ecuación de cantidad de movimiento*

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{Mx} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{My} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_{Mz} \quad (\text{Ec. 11})$$

- *Ecuación de energía interna*

$$\rho \frac{De}{Dt} = -p \nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \phi + S_e \quad (\text{Ec. 12})$$

- *Ecuación de estado*

$$p = p(\rho, T) \quad (\text{Ec. 13})$$

$$e = e(\rho, T) \quad (\text{Ec. 14})$$



### 3.1.8. Modelo k-ε

Para las diversas simulaciones se ha hecho uso del modelo de turbulencia k-ε. Este modelo RANS de dos ecuaciones no simula directamente las fluctuaciones turbulentas de pequeña escala, algo que habría que hacer si se simularan directamente las ecuaciones de Navier-Stokes dependientes del tiempo.

En el presente trabajo se recurre a modelos RANS al tratarse de simulaciones en flujo estacionario, ahorrando así en coste computacional con la eliminación de valores transitorios y sin sacrificar la precisión de las magnitudes medias.

El modelo usado en este trabajo ha sido el k-ε Standard con *Non-Equilibrium Wall Functions*. Este modelo solo es válido para flujo turbulento.

En el modelo k-ε, se parte de una suposición de flujo totalmente turbulento. Las ecuaciones pueden ponerse como:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{U}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{U}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{Ec. 16})$$

Siendo  $S_{ij}$  el tensor de deformación del flujo turbulento medio y las constantes  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$ ,  $C_{1\varepsilon}$  y  $C_{2\varepsilon}$  constantes adimensionales ajustables experimentalmente.

La viscosidad turbulenta se modela como:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Ec. 17})$$

Los valores más aceptados comúnmente son  $C_\mu=0.09$ ;  $\sigma_k=1.00$ ;  $\sigma_\varepsilon=1.3$ ;  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ; y  $C_{2\varepsilon}=1.92$ .

### 3.1.9. FLUENT: modelo segregado y modelo acoplado

#### *Solución numérica*

La dinámica de fluidos computacional usa la técnica basada en volúmenes de control para resolver las ecuaciones diferenciales de conservación de momento y escalares como la masa, la energía y la turbulencia.

Una vez dividido el dominio en volúmenes de control, para hallar soluciones, FLUENT opera del siguiente modo:

- Integración de las ecuaciones que gobiernan volúmenes de control para crear ecuaciones algebraicas con incógnitas como la presión o la velocidad.
- Solución de estas ecuaciones discretizadas.

### *El modelo segregado*

El modelo de resolución que se emplea en este trabajo es el segregado. Este modelo es el más adecuado para una simulación en 3D como la que requiere este trabajo. Del uso de otros modelos resultarían simulaciones menos reales y se requeriría un tiempo mayor de simulación.

Este modelo trabaja resolviendo las ecuaciones que gobiernan el sistema de forma secuencial. Dado que las ecuaciones no son lineales, el modelo es iterativo y repite el proceso hasta que este alcanza el criterio de convergencia.

Cada iteración sigue los siguientes pasos:

- 1) Actualización de propiedades
- 2) Resolución de ecuaciones de momento
- 3) Resolución de ecuaciones de corrección de la presión (continuidad). Actualización de la presión, flujo de masa.
- 4) Resolución de la ecuación de la energía, las especies, turbulencia y otras ecuaciones escalares.
- 5) Comparación del resultado con el criterio de convergencia. Si este no se ha alcanzado se inicia el proceso de iteración desde el punto uno hasta hallar una solución que lo cumpla.

Cuando se resuelve un flujo existen dos estrategias para la resolución del sistema de ecuaciones, resolver el sistema acoplado ( $v$  y  $p$  al mismo tiempo) o resolver el sistema segregado ( $v$  y  $p$  por separado).

Los métodos segregados calculan los dos vectores incógnita,  $v$  y  $p$ , separadamente. Esta aproximación involucra la solución de dos sub-sistemas lineales de menor tamaño, uno para  $v$  y otro para  $p$ ; en algunos casos se resuelve un sistema reducido para una incógnita auxiliar.

Estos sub-sistemas se pueden resolver con solvers iterativos, directos, o una combinación de ellos.

### *El modelo acoplado*

Los métodos acoplados resuelven el sistema de ecuaciones completo, sin usar explícitamente sistemas reducidos. Estos métodos incluyen tanto solvers directos (o formulación explícita) como iterativos (o formulación implícita). Los últimos típicamente con alguna forma de pre condicionamiento.

Las formulaciones implícita y explícita difieren en la forma en que se linealizan las ecuaciones. En la formulación implícita cada nueva incógnita se calcula en función de magnitudes desconocidas de celdas adyacentes, mientras que en la formulación explícita cada incógnita se obtiene en función de magnitudes conocidas de celdas adyacentes.

### *Linealización: formulaciones implícita y explícita*

Independientemente del método que se emplee para resolver las ecuaciones de gobierno discretizadas, estas deben ser linealizadas para obtener un sistema de ecuaciones para las variables dependientes en cada celda del dominio computacional.

El *pressure-based solver* linealiza las ecuaciones de gobierno discretizadas empleando una *formulación implícita* respecto a la variable dependiente de la ecuación. El *pressure-based solver* resuelve al mismo tiempo las incógnitas de todas las celdas para una única variable (por ejemplo: la presión).

El *density-based solver* permite elegir entre ambas formas de linealización. El *density based solver* con linealización *implícita* de las ecuaciones, resuelve las variables  $p$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $w$  y  $T$  en todas las celdas del dominio computacional al mismo tiempo.

### 3.2. Análisis dimensional. Coeficientes adimensionales.

Los resultados que se obtengan de las simulaciones dependerán de las variables concretas que participan en el caso a estudiar. Para que estos valores puedan ser comparables con otros casos que aparecen en diversos textos de la biografía, es recomendable expresarlos con parámetros adimensionales.

Las variables que influyen en el problema presentado en este trabajo son:

$$f(F, b, L, U, \alpha, \delta, \rho, \mu, g) \quad (\text{Ec. 18})$$

donde:

- $F$ : Fuerza ejercida por el aire sobre el panel (N)
- $B$  y  $L$ : ancho y largo del panel (m)
- $U$ : velocidad media del flujo exterior (m/s)
- $\alpha$ : ángulo del panel respecto al flujo incidente
- $\delta$ : ángulo lateral de incidencia del flujo
- $\rho$ : densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\mu$ : viscosidad dinámica ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
- $g$ : fuerza gravitatoria ( $\text{m/s}^2$ )

Mediante análisis dimensional se puede expresar que:

$$\frac{F}{\rho U^2 L^2} = \varphi(\alpha, \delta, \frac{b}{L}, \frac{\mu}{\rho U L}) \quad (\text{Ec. 19})$$

reordenando términos,

$$F = \varphi(\alpha, \delta, \frac{b}{L}, \frac{\mu}{\rho U L}) \rho U^2 L^2 \quad (\text{Ec. 20})$$

aunque es más común verla con la forma,

$$F = \frac{1}{2} C_f \rho U^2 A \quad (\text{Ec. 21})$$

donde  $C_F$  es el coeficiente adimensional de fuerza y  $A$  el área característica de la superficie.

Este coeficiente depende del ángulo de ataque, de las dimensiones del panel, y del número de Reynolds.

$$C_f = C_f(\alpha, \delta, \frac{b}{L}, Re) \quad (\text{Ec. 22})$$

Por lo tanto para caracterizar el coeficiente  $C_F$  deben realizarse ensayos o simulaciones variando estos cuatro parámetros, como se mostró de la Figura 4 a la Figura 6.

Sobre la influencia del número de Reynolds, se puede afirmar que para valores del número de Reynolds por encima de 1000, el coeficiente adimensional de fuerza se ve afectado únicamente por el ángulo y no por la velocidad del fluido.

El espesor del panel, al ser mucho menor que las otras dos dimensiones, tiene muy poca influencia tal y como se verá en capítulos posteriores de este trabajo.

### 3.2.1. Coeficiente de resistencia

En capítulos posteriores de este trabajo se reflejan los resultados obtenidos en las simulaciones. Para el cálculo del coeficiente de resistencia se ha empleado como área característica el área real del panel, y no la superficie proyectada. De este modo es más fácil hacer después un análisis comparativo entre los diferentes ángulos de ataque al ser el área real la misma en todos los casos.

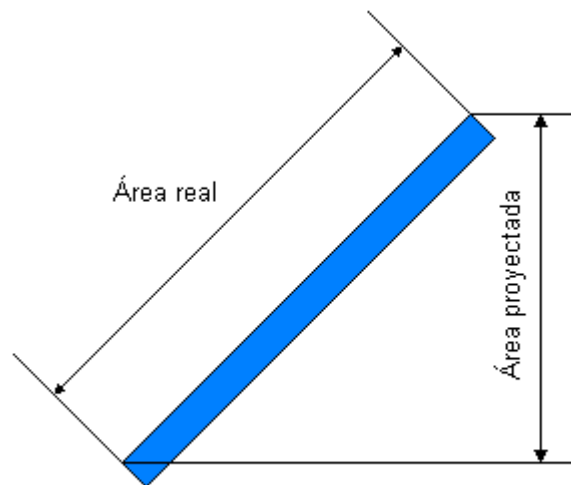


Figura 8. Visualización del área real frente al área proyectada

La fuerza es la resultante de sumar las fuerzas paralelas a los ejes de coordenadas.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (\text{Ec. 23})$$

Para calcular el coeficiente de resistencia a partir de la fuerza que soporta el panel, se emplea la ecuación:

$$C_f = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (\text{Ec. 24})$$

Que se mostrará simplificada para cada una de las direcciones paralelas a los ejes de coordenadas.

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho AU^2} \quad (\text{Ec. 25})$$

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\rho AU^2} \quad (\text{Ec. 26})$$

$$C_z = \frac{F_z}{\frac{1}{2}\rho AU^2} \quad (\text{Ec. 27})$$

### 3.3. Criterio de signos

#### 3.3.1. Fuerzas

La fuerza ejercida por el viento sobre cada panel es descompuesta en sus tres componentes paralelas a los ejes de coordenadas. En el caso de las simulaciones en 2D, siguen el esquema mostrado en las figuras siguientes (Figura 9 y Figura 10).

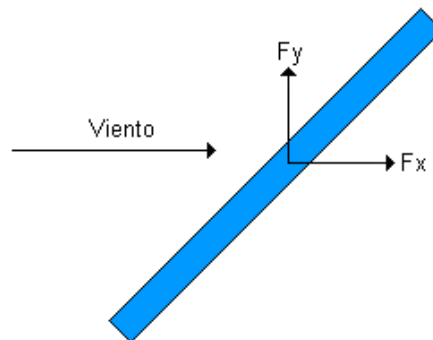


Figura 9. Representación de la fuerzas horizontal y vertical producidas por el viento incidente

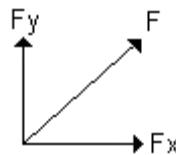


Figura 10. Representación de la fuerza global F (casos en 2D).

#### 3.3.2. Momentos de giro

La fuerza global se ha descompuesto en dos fuerzas: una perpendicular al panel, y otra paralela a la superficie de este. Aquí se muestra sólo la fuerza perpendicular, por ser la que genera el momento de giro.

La distancia  $x$ , que define el punto donde se aplica la fuerza resultante, se ha medido con el criterio mostrado de la Figura 11 a la Figura 13:

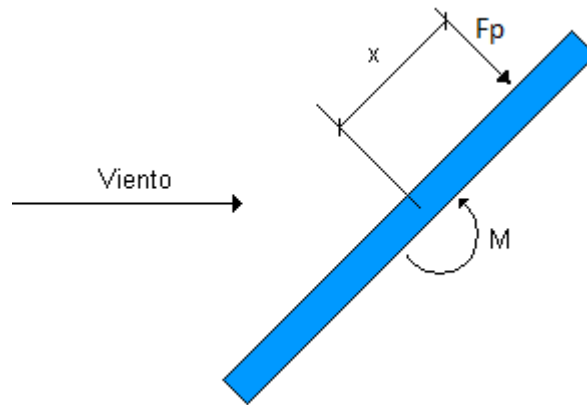


Figura 11. Criterio de signos para definir el momento de giro y el punto de aplicación de la fuerza resultante para un panel con ángulo positivo.

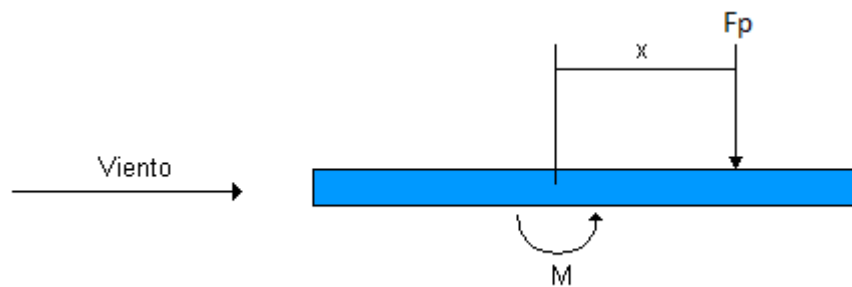


Figura 12. Criterio de signos para definir el momento de giro y el punto de aplicación de la fuerza resultante para un panel con ángulo nulo ( $0^\circ$ )

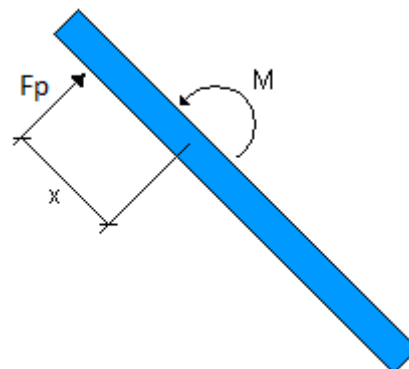


Figura 13. Criterio de signos para definir el momento de giro y el punto de aplicación de la fuerza resultante para un panel con ángulo negativo.

El criterio de signos para el momento de giro viene marcado por el eje Z. De acuerdo a las figuras anteriores, el eje Z sale desde el papel en dirección hacia el lector. Un momento de giro positivo será por tanto siempre en dirección antihoraria.

Puesto que esta versión de Fluent solo da el par torsor y la fuerza resultante, la distancia al punto de aplicación se ha calculado con la ecuación siguiente

$$x = \frac{M}{F_p} \quad (\text{Ec. 28})$$

#### 4. Validación del modelo numérico

##### 4.1. Revisión bibliográfica

Diversos autores han estudiado experimentalmente el flujo en placas planas, tanto paralelas como perpendiculares o inclinadas respecto a la dirección del flujo.

Algunos datos sobre placas planas que se pueden encontrar en la bibliografía, según la disposición de dichas placas en el medio, son los siguientes:

Geometría	Tipo de flujo	$C_f = \frac{F}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2}$
Placa plana frontal al flujo. Sin presencia de paredes próximas	Turbulento	$2^{(1)}$
	Bidimensional	1.98 [1]
	Re>1000	1.9 [2]
	Placa cuadrada 3D Laminar	1.1 [2]
	Turbulento	1.2 [2]
Placa plana frontal al flujo. En presencia de una superficie fija horizontal inferior	Turbulento 2D	1.2 [2]
	Placa cuadrada 3D Turbulento	1.1 [2]
		1.18 [1]
		1.14 [3]
	Placa rectangular 3D	1.07-1.16 [2]
Placas planas en serie frontales al flujo. Sin presencia de paredes próximas	Sin separación	1.1 [2]
	Espaciado crítico 1.5b	0.8 [2]
	Separación infinita	2.2 [2]
Placas planas inclinadas frontales al flujo. Sin presencia de paredes próximas	Turbulento 2D	Figura 18 [4]

<sup>(1)</sup> Valor típico según bibliografía general.

Tabla 1. Valores medios de  $C_f$  según diversas fuentes bibliográficas

También hay diversas gráficas que intentan concretar estos parámetros en función de la relación de aspecto, el ángulo de ataque o el número de Reynolds.

En la Figura 14 se puede estimar el coeficiente de resistencia para una placa plana paralela al flujo. Su valor depende del número de Reynolds y de su rugosidad.

En el caso de placas perpendiculares al flujo, los valores son completamente diferentes. Buresti [1] propone valores concretos en función de la geometría de la pieza. El único criterio que tiene en cuenta es si se trata de un flujo bidimensional o tridimensional (Figura 15). En el caso de una placa plana, el caso tridimensional siempre tiene menor  $C_d$  debido a la aparición del efecto borde.



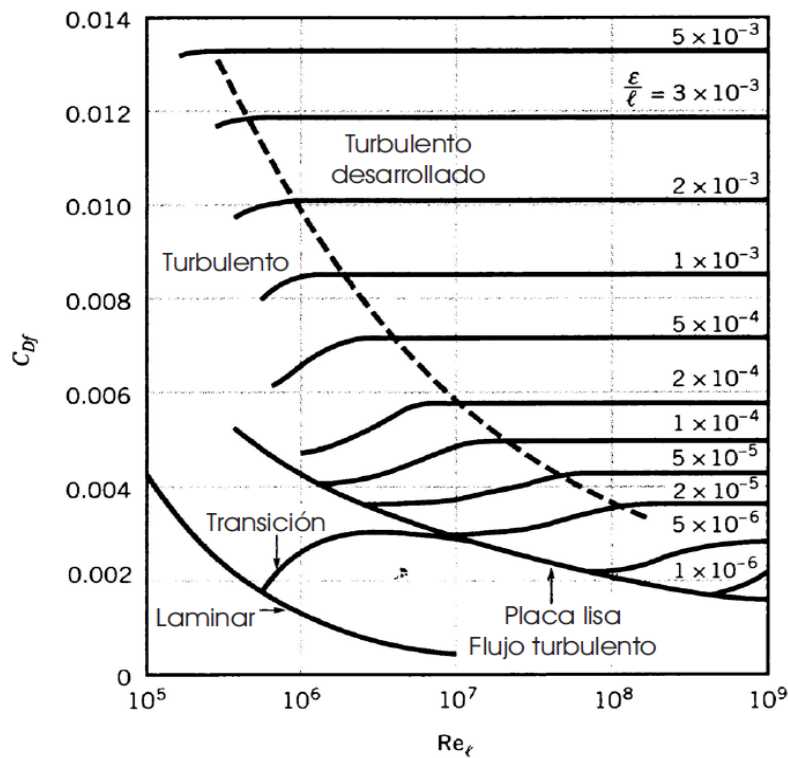


Figura 14. Coeficiente de resistencia para placa plana paralela al flujo

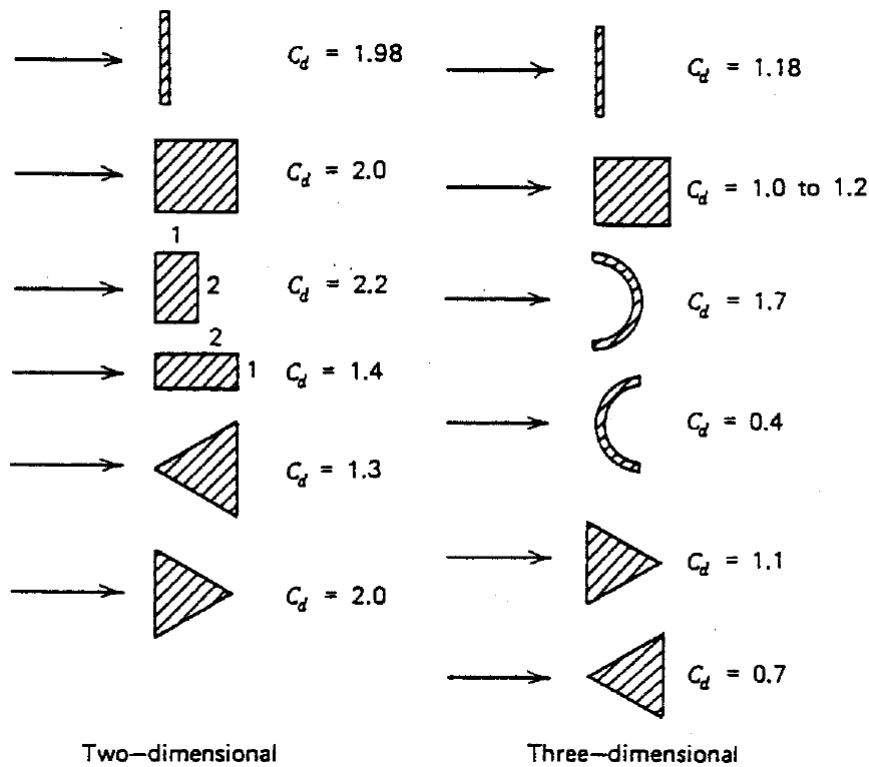


Figura 15. Coeficiente de resistencia en cuerpos bi y tridimensionales. [1]

Otra propuesta es la de Lindenburg [5] que compara en una única gráfica los estudios de varios autores (Figura 16). Para una placa infinitamente ancha, su ratio de aspecto  $b/L$  tendría un valor

infinito y, entrando en la gráfica con un valor 0.0, se obtiene un  $C_f=1.98$ , idéntico al valor propuesto por Buresti [1] para flujo bidimensional.

Los paneles usados en el presente trabajo tienen un ratio de aspecto de 0.5 pero, al unirse en bloques de 3-7 paneles, se comportan como grupos con un ratio de aspecto igual a 1.5-3.5. Un valor teórico de  $C_f$ , según esta figura, estaría en torno a 1.20.

En capítulos posteriores se podrá ver que este valor de 1.20 no es cierto porque los paneles no están a  $90^\circ$  ni tampoco están aislados (están cerca del suelo y unas filas de paneles cubren a otros).

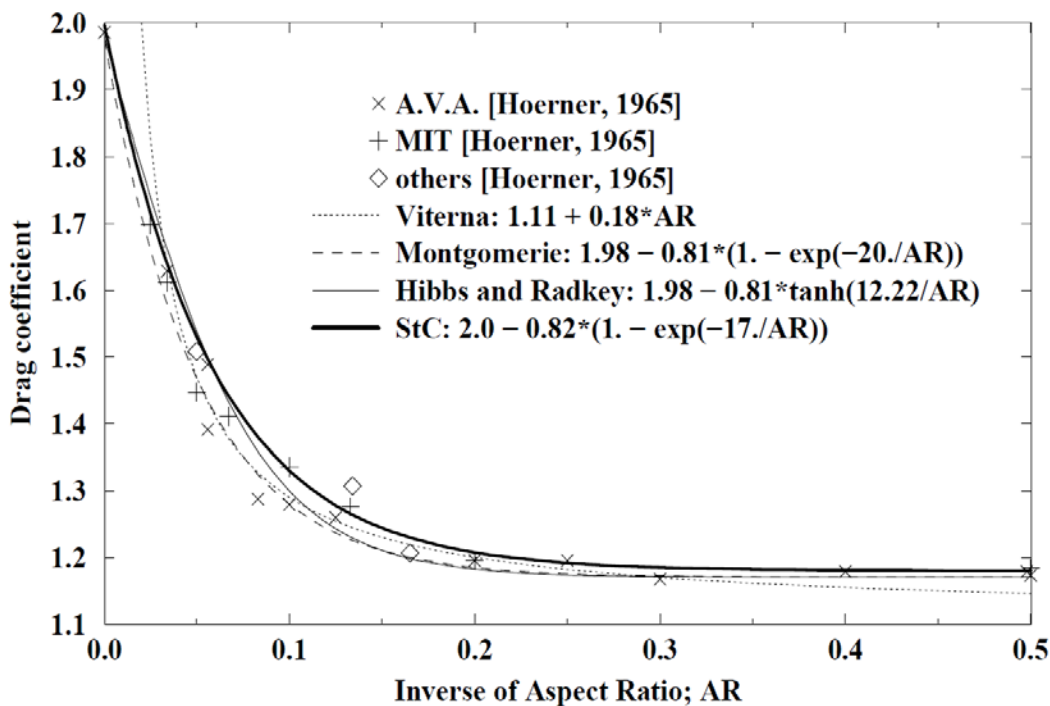


Figura 16.  $C_f$  de una placa rectangular en función de su ratio de aspecto [5]

[3] propone la siguiente ecuación para placas planas rectangulares aisladas:

$$C_N=1.10+0.02(b/c + c/b) \quad (\text{Ec. 29})$$

Donde  $C_N$  es la componente normal del coeficiente de resistencia y b-c son el ancho y el alto de la placa respectivamente. Para una relación  $\frac{1}{2}$  el  $C_N$  tiene un valor de 1.15 como se mencionó en la Tabla 1.

Para el caso de dos placas planas, también perpendiculares al flujo y separadas una distancia S, la relación es la mostrada en la Figura 17. No es posible extraer datos para nuestro trabajo porque la relación  $s/\sqrt{bc}$  tiene valores de 6.4 y 8.5, fuera de la tabla.

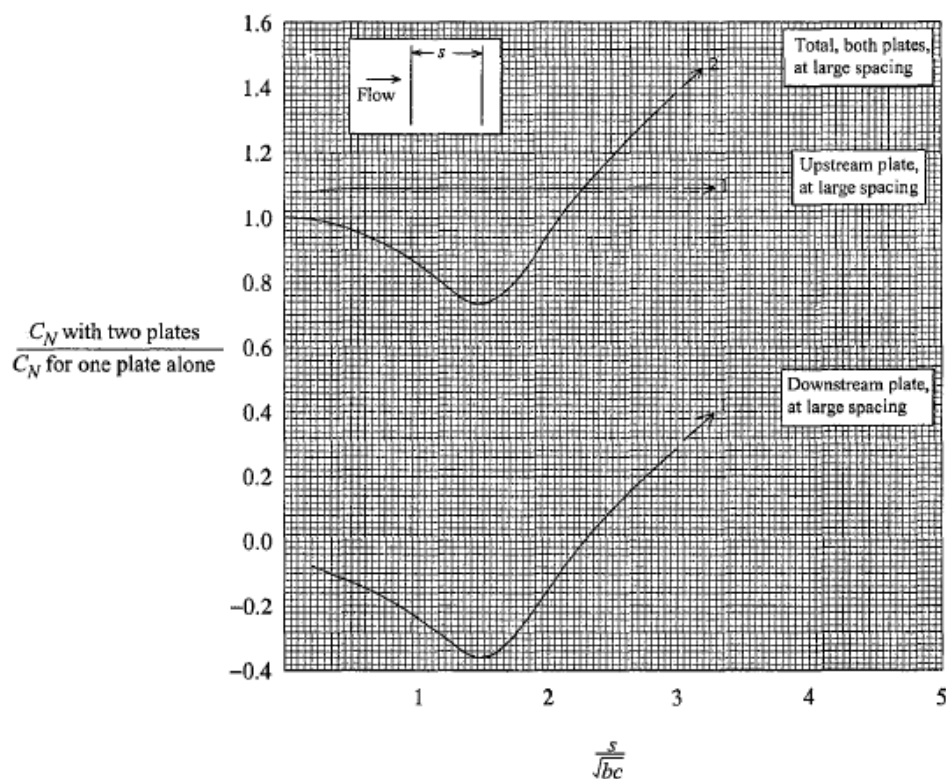


Figura 17.  $C_N$  para dos placas idénticas planas paralelas y perpendiculares al flujo [3].

Hoerner [4] propone un valor dependiente única y exclusivamente del ángulo de ataque (Figura 18).

Se puede apreciar en esta figura que el valor teórico de  $C_d=1.98$ , manejado anteriormente para placas perpendiculares al flujo, se reduce aproximadamente un 10% para ángulos de  $60^\circ$ , un 40% para ángulos de  $+35^\circ$ , y un 60% con ángulos de  $+10^\circ$ . Para ángulos de  $0^\circ$  el valor será próximo a cero.

Tomando como referencia este porcentaje de reducción y el valor de 1.20 estimado en la Figura 16, se puede hacer una estimación del  $C_f$  de 1.08, 0.72 y 0.48 para  $+60^\circ$ ,  $+35^\circ$  y  $+10^\circ$  respectivamente.

Estos valores no deben tomarse en consideración como valores fiables, sino como una guía de cara a poder interpretar los resultados obtenidos con las simulaciones. En los resultados ofrecidos por FLUENT se verán aún más reducidos estos coeficientes debido a, como ya se ha expuesto, la presencia de un suelo y la protección que ejercen unas filas de paneles sobre otras.

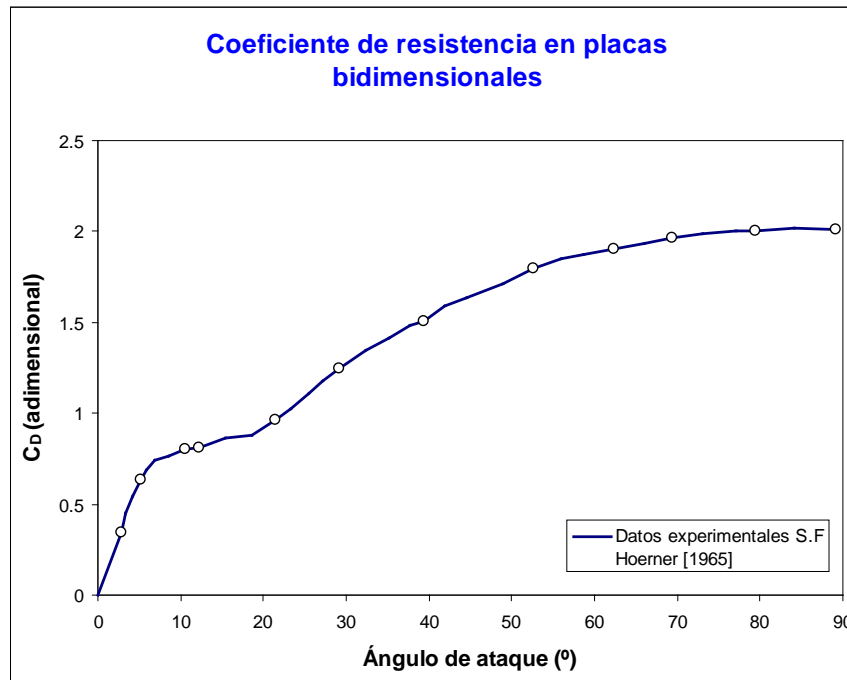


Figura 18. Coeficiente de resistencia en placas planas frontales al flujo para diferentes ángulos de ataque sin presencia de paredes próximas [4]

Bhaduri y Murphy [6] muestran unas curvas similares evaluadas sólo para los primeros 35°. Este ángulo suele ser el ángulo máximo al que, en condiciones normales, operan en servicio la mayoría de los perfiles alares (Figura 19)

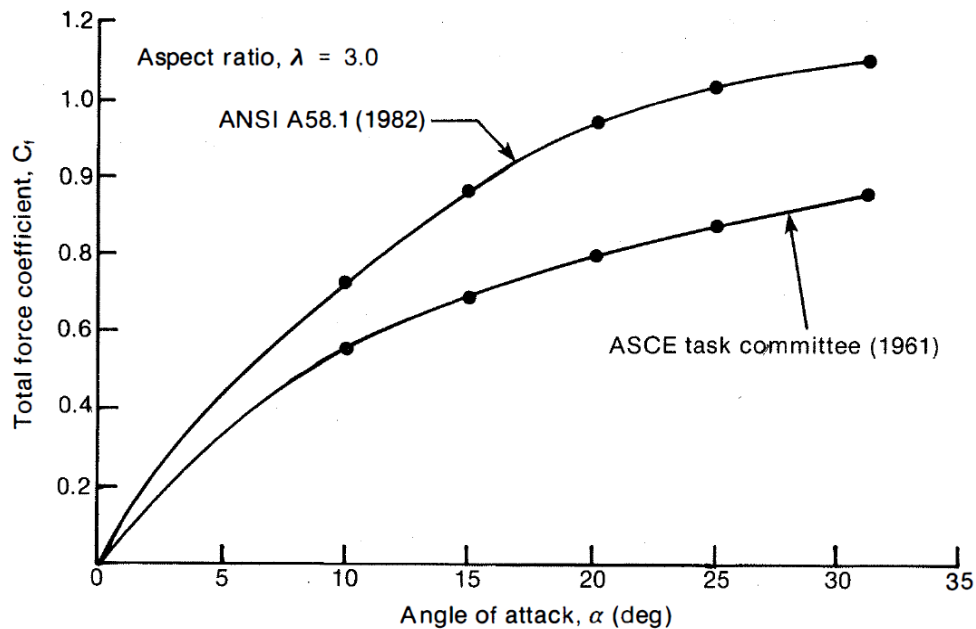


Figura 19. Coeficiente de resistencia total en función del ángulo de ataque. ( $\lambda = \frac{b}{L} = 3.0$ ) [6]

En el caso de placas perpendiculares al flujo, el coeficiente  $C_d$  tiene el mismo valor que el  $C_f$ , al ser la sustentación  $C_L$  nula. Sin embargo, en ángulos intermedios el coeficiente  $C_d$  surge como una combinación entre  $C_f$  y  $C_L$ . Esto no es tenido en cuenta por los autores anteriormente mencionados.

Unos valores típicos que se pueden encontrar en la bibliografía general o en determinado programas informáticos son los graficados en la Figura 20.

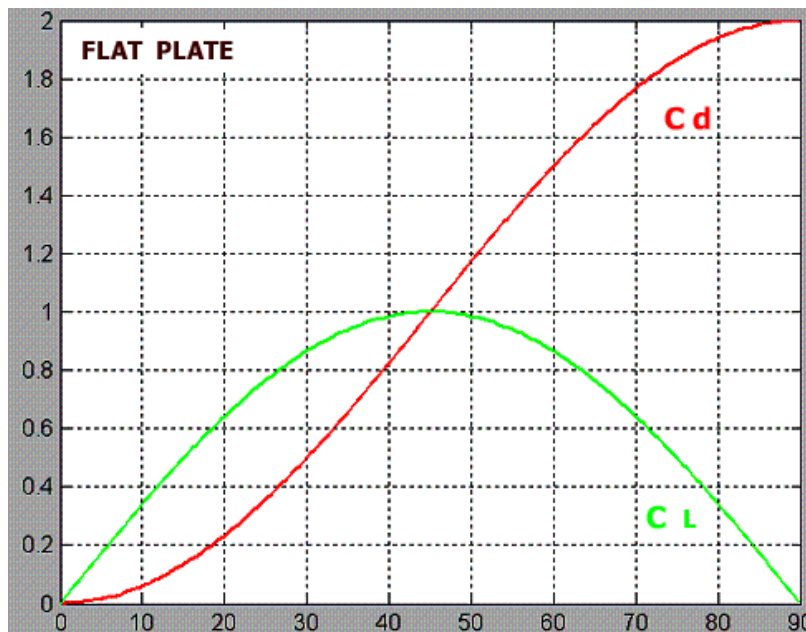


Figura 20.  $C_d$  y  $C_L$  típico de placa plana en función del ángulo de ataque

En [7] se estudió la influencia del viento sobre paneles rectangulares frontales al viento con materiales de porosidad variable. Para una panel impermeable con relación de aspecto ancho/alto de 3.5 situado a 5 metros sobre el terreno, se obtuvo valores de  $C_f$  en el intervalo 1.35-1.65.

A pesar de que el presente trabajo busca hallar los coeficientes de resistencia para una instalación fotovoltaica, el valor que empleará el diseñador en sus cálculos será siempre una fuerza que variará con la velocidad del viento. Se hace imprescindible conocer también el valor de la velocidad del viento.

En [8], partiendo de los datos históricos obtenidos de una estación meteorológica durante varias décadas, comprueba algunas distribuciones probabilísticas y establece valores máximos de la velocidad del viento con un determinado índice de fiabilidad de no ser superados. Ha de prestarse atención a que el viento es una magnitud muy variable y se han de mirar diversas magnitudes como la velocidad de las rachas, la velocidad media mantenida en periodos de 10 y 60 minutos, frecuencia y duración de tormentas a lo largo del año, etc.

#### 4.2. Normativas

Según la información meteorológica disponible del aeropuerto de San Javier, entre el 1 de Julio de 1996 y el 1 de Julio de 2013, la mayor racha de viento fue de 174 km/h (48.33 m/s). Esta medida corresponde a una medida standard realizada con anemómetro a 10 m de altura sobre terreno abierto [9]. Esta velocidad, a una altura de 1 ó 2 metros sobre el nivel del suelo, es mucho menor debido a la rugosidad del terreno y posibles obstáculos sobre este.

Las normativas parten de una velocidad media que es corregida por diversos factores que dependen del tipo de construcción, rugosidad del terreno, obstáculos naturales y artificiales, orografía, etc.

Para poder tener una visión global se enumeran a continuación algunos valores aproximados extraídos de algunas normativas.

#### NBA-AE-88

La desfasada Norma Básica de la Edificación sobre Acciones en la Edificación (NBA-AE-88), establecía una carga de viento definida por la ecuación:

$$p = w \cdot c \quad (\text{Ec. 30})$$

donde  $p$  es la sobrecarga unitaria,  $w$  la presión dinámica, y  $c$  el coeficiente eólico. Según la tabla 5.1 de dicha normativa (Figura 21), suponiendo una altura menor a 10m, la velocidad del viento es de 28m/s, y una presión dinámica de 50kg/m<sup>2</sup>.

Tabla 5.1 Presión dinámica del viento				
Altura de coronación del edificio sobre el terreno en m, cuando la situación topográfica es		Velocidad del viento $v$		Presión dinámica $w$
Normal	Expuesta	m/s	km/h	kg/m <sup>2</sup>
De 0 a 10	—	28	102	50
De 11 a 30	—	34	125	75
De 31 a 100	De 0 a 30	40	144	100
Mayor de 100	De 31 a 100	45	161	125
—	Mayor de 100	49	176	150

Figura 21. Presión dinámica del viento

Según la tabla 5.4 de dicha normativa, para construcciones abiertas, el coeficiente  $c$  para superficies planas puede tener valores de hasta 1.6 según su orientación al viento (barlovento o sotavento) y el ángulo de incidencia. De este modo se puede estimar una sobrecarga máxima con valor

$$p = w \cdot c = 50 \cdot 1.6 = 80\text{kg/m}^2 = 784.8\text{N/m}^2 \quad (\text{Ec. 31})$$

Esta carga, sobre un panel de 2m<sup>2</sup> supone una fuerza de 1570N.

Si se aplicara este valor de fuerza a la (Ec. 24) y una velocidad de 28 m/s, el coeficiente de resistencia que se conseguiría según la normativa sería:

$$C_f = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^2} = \frac{1570}{0.5 \cdot 1.25 \cdot 2 \cdot 28^2} = 1.6 \quad (\text{Ec. 32})$$

#### CTE

El actual Código Técnico de la Edificación, en su capítulo *Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación* posee un método más complejo basado en coeficientes que se puede resumir con la fórmula:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \quad (\text{Ec. 33})$$

donde  $q_b$  es la presión dinámica del viento,  $c_e$  el coeficiente de exposición, y  $c_p$  el coeficiente eólico o de presión.

El factor  $q_b$  depende del emplazamiento de la obra. Según el Anejo D.1, en la zona de Cartagena la velocidad básica del viento es de 27 m/s. Con este valor se puede calcular un valor de 456 N/m<sup>2</sup>.

El valor de  $c_e$  se puede extraer de la tabla 3.4 de dicha normativa, escogiendo finalmente un valor de 2.1 (Terreno rural llano y construcción de altura inferior a 3 metros).

El coeficiente eólico  $c_p$  es más complejo de decidir al no ser el seguidor de paneles fotovoltaicos muy similar a una estructura típica de nave industrial. Se pueden suponer los soportes de la instalación como marquesinas a un agua, con tamaño superior a 10m<sup>2</sup> (algo común cuando hay varios paneles juntos) y con un factor de obstrucción al paso del viento igual a cero. En función del ángulo de incidencia del viento y de la inclinación del ángulo de ataque se obtienen coeficientes variables, en ocasiones cercanos a 3.

Un valor aproximado de la sobrecarga de viento, manteniéndose en el lado de la seguridad, sería de:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p = 456 \cdot 2.1 \cdot 3 = 2873 \text{ N/m}^2 \quad (\text{Ec. 34})$$

El nuevo valor es casi más del triple que el calculado con la normativa anterior.

Como dato orientativo, si se supusiera un coeficiente de resistencia similar (1.6) podría deducirse que esta estimación de 2873 N/m<sup>2</sup> es válida para un flujo de 53.6m/s. Si se supusiera un coeficiente mayor (2), sería válido para un flujo de 48 m/s. Una visión más global se puede ver en la Figura 22.

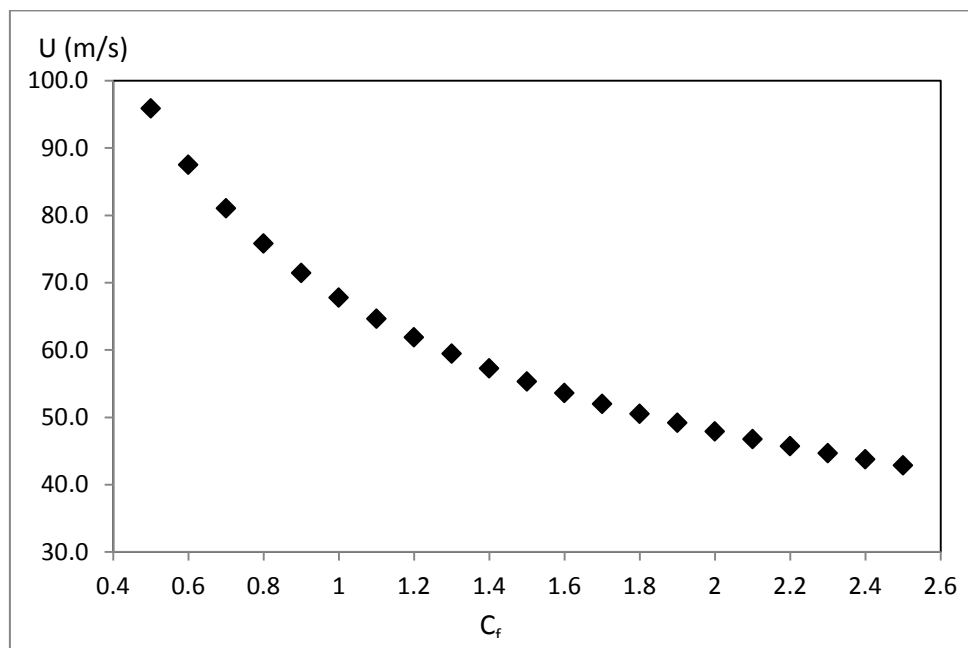


Figura 22. Relación entre la velocidad del viento y el  $C_f$  con una carga de 2873 N/m<sup>2</sup>

#### UNE-EN 1991-1-4

El Eurocódigo, en la parte 1-4 dedicada a acciones de viento, propone un sistema de cálculo algo más complejo. Muchos de los coeficientes figuran en dicha normativa pero otros han de buscarse en las normativas nacionales propias de cada estado de la Unión Europea.

La velocidad básica del viento  $v_b$  debe buscarse en las normas nacionales. Como ya se ha comentado, en el CTE se da un valor de 27m/s para la zona de Cartagena.

El terreno de estudio es de tipo II (Área con vegetación baja y obstáculos alejados) y sus coeficientes asociados son  $z_0=0.05m$  y  $z_{min}=2m$ .

La velocidad básica del viento  $v_b$  puede verse alterada por la altura y la orografía del terreno.

$$v_m(z) = c_r(z)c_o(z)v_b \quad (\text{Ec. 35})$$

donde  $v_m$  es la velocidad media,  $c_r$  es el factor de rugosidad del terreno y  $c_o$  el coeficiente topográfico del terreno.  $C_0$  en este caso tiene un valor de 1 al no estar la instalación en zona de fuertes desniveles (colinas, precipicios, etc).

Como la altura de los paneles (1m) es menor que  $z_{min}$  (2m) se emplea la siguiente expresión para hallar  $c_r$ :

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) = k_r \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right) = 0.19 \ln\left(\frac{2}{0.05}\right) = 0.7 \quad (\text{Ec. 36})$$

donde  $k_r$  es un factor del terreno cuyo valor en este caso es de 0.19. Sustituyendo en la (Ec. 35) se llega a un valor de  $v_m=18.9$  m/s

La componente turbulenta del viento tiene un valor medio nulo y una desviación típica  $\sigma_v$  que se determina con la expresión:

$$\sigma_v = k_r v_b k_I = 0.19 \cdot 27 \cdot 1 = 5.13 \quad (\text{Ec. 37})$$

Donde  $k_I$  es el factor de turbulencia con valor unitario.

La intensidad de la turbulencia  $I_v(z)$  se obtiene como la desviación típica dividida entre la velocidad media del viento:

$$\begin{aligned} I_v(z) &= I_v(z_{min}) = \frac{\sigma_v}{v_m(z_{min})} = \\ &= \frac{k_I}{c_0(z_{min}) \ln\left(\frac{z_{min}}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{2}{0.05}\right)} = 0.271 \end{aligned} \quad (\text{Ec. 38})$$

La velocidad de pico  $q_p(z)$  incluye la velocidad media del viento y las fluctuaciones a corto plazo.

$$q_p(z) = [1 + 7I_v(z)]0.5\rho v_m^2 = \frac{\sigma_v}{v_m(z_{min})} = 646.77 \text{N/m}^2 \quad (\text{Ec. 39})$$

Tomando los paneles como marquesinas soportadas por una estructura con coeficiente de bloqueo al paso del viento por debajo de dicha marquesina  $\phi=0$ , se pueden extraer los valores



del coeficiente de fuerza  $c_f$  según tablas de dicha normativa. Su valor fluctúa entre un máximo y un mínimo que, de un modo abreviado, se resume en la Tabla 2.

Ángulo de la cubierta $\alpha$	$c_f$ máx	$c_f$ min
0°	+0.2	-0.5
10°	+0.5	-0.9
30°	+1.2	-1.8

Tabla 2. Valores de  $c_f$  en función del ángulo de la marquesina a un agua [10]

La fuerza del viento  $F_w$  se puede determinar con la ecuación:

$$F_w = c_s c_d c_f q_p A_{ref} \quad (\text{Ec. 40})$$

Donde  $A_{ref}$  es el área de referencia y  $c_s c_d$  es el factor estructural. El factor  $c_s c_d$  puede tomarse con valor unitario (edificios de menos de 15m de altura), y el área de referencia como  $2\text{m}^2$ . Aplicando estos coeficientes en la (Ec. 40) se obtienen diversos valores que se muestran en la Tabla 3:

Ángulo de la cubierta $\alpha$	$F_w$ máx (N)	$F_w$ min (N)
0°	258.71	-646.77
10°	646.77	-1164.19
30°	1552.25	-2328.37

Tabla 3. Valores de  $F_w$  para diversos ángulos

Estas son las fuerzas que la normativa exige tener en cuenta para calcular una construcción de este tipo.

A modo de referencia, se puede deshacer el problema hacia atrás y estimar el coeficiente de fuerza  $C_f$  que produciría estas fuerzas, con diversas velocidades. En la Tabla 4 se muestran estos valores.

	Cf									
v(m/s)	18.9		20 <sup>(*)</sup>		25 <sup>(*)</sup>		27		30 <sup>(*)</sup>	
	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min	máx	min
0°	0.58	-1.45	0.52	-1.29	0.33	-0.83	0.28	-0.71	0.23	-0.57
10°	1.45	-2.61	1.29	-2.33	0.83	-1.49	0.71	-1.28	0.57	-1.03
30°	3.48	-5.21	3.10	-4.66	1.99	-2.98	1.70	-2.56	1.38	-2.07

Tabla 4. Valores del coeficiente de arrastre  $C_f$  que producirían la  $F_w$  de la Tabla 3 si se supusieran diversas velocidades de viento.

Si se empleara en la Tabla 4 un valor de velocidad del viento de 32m/s, se obtendrían los mismos coeficientes de la Tabla 3. Se puede afirmar que, para este caso concreto, la normativa hace un cálculo estimativo para vientos de 32 m/s.

#### 4.3. Definición de la geometría en GAMBIT

##### 4.3.1. Dominio computacional

El tamaño y tipo de malla debía ser probado para garantizar resultados fiables. Con esta finalidad se realizaron unos casos iniciales con diferentes tipos de malla y se compararon sus resultados con datos experimentales de referencia contrastados.

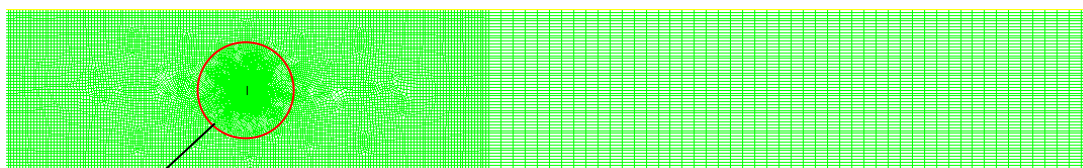
Siguiendo los modelos empleados en el anterior trabajo [11] se han definido varias geometrías según cada caso. Para la validación del modelo se ha partido de una placa plana aislada y perpendicular al flujo. Las dimensiones de la placa bidimensional son:

$$L=0.2\text{m} \quad b=1\text{m} \quad c=0.04\text{ m}$$

y las distancias hasta los límites del dominio computacional son:

$$L_{\text{upstream}}=30L \quad L_{\text{downstream}}=100L \quad L_{\text{lateral}}=10L$$

Un detalle de la malla se muestra en la Figura 23 y en la Figura 24.



Panel fotovoltaico

Figura 23. Malla y panel fotovoltaico.

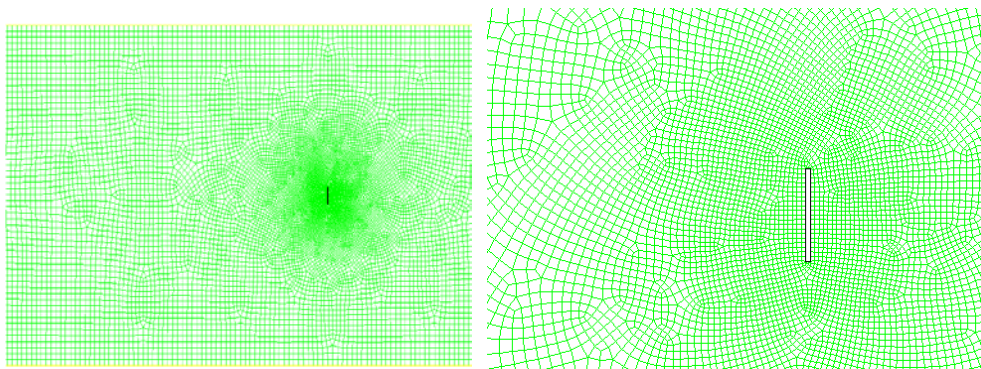


Figura 24. Detalle de la malla empleada en el estudio de validación

##### 4.3.2. Sensibilidad de la malla

Como ya se ha mencionado en el apartado 4.1, existe mucha bibliografía dedicada este caso en concreto, dándole un valor al coeficiente de resistencia de  $C_f=2$ . En la Tabla 5 se resume la influencia del número de celdas sobre el valor de  $C_f$  y los valores se representan en la Figura 25.

A partir de la malla 7 – refinada posteriormente en las zonas de mayor gradiente de velocidad – no se aprecia una diferencia significativa y se aumenta el coste computacional innecesariamente. Por ello se ha elegido como referencia la malla 7 para realizar el resto del estudio del presente trabajo.

Malla	Celdas	Cf
1	1696	1.5606
2	4229	1.8768
3	5570	1.8983
4	9512	1.8877
5	18131	1.9932
6	19730	1.8831
7	20931	1.9932
8	36511	1.9933
9	55116	2.0076
10	75324	1.9729
11	201735	1.9752

Tabla 5. Características y resultados de las mallas de validación

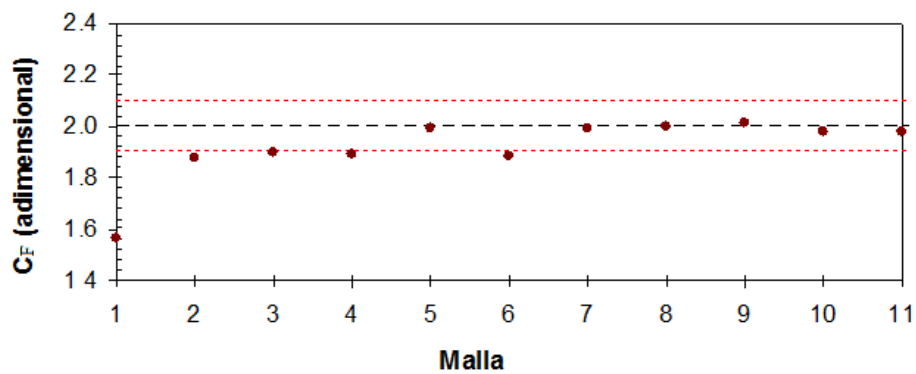


Figura 25. Estudio de sensibilidad de malla

#### 4.3.3. Casos en 2D

Los paneles han sido creados como rectángulos de 2m de alto y 6cm de espesor. Alrededor de cada panel se ha creado un óvalo (Figura 26) con dos objetivos:

- Poder refinar la malla en las proximidades de dicho panel
- Garantizar un mallado más regular en dicha región (Figura 27).

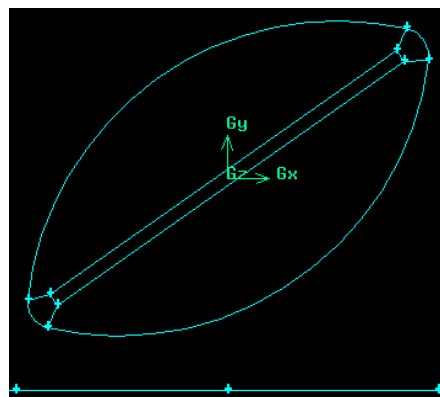


Figura 26. Detalle de un panel en 2D y su óvalo

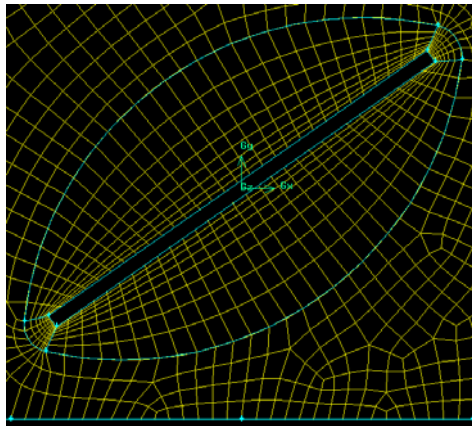


Figura 27. Detalle de un panel en 2D y su óvalo, mallado

Sobre los paneles, previsiblemente y como se confirmará más tarde, ocurren los mayores gradientes de velocidad y presiones. Antes de realizar cualquier simulación se refina la malla en las proximidades de los paneles y del suelo para intentar conseguir la reproducción de la capa límite.

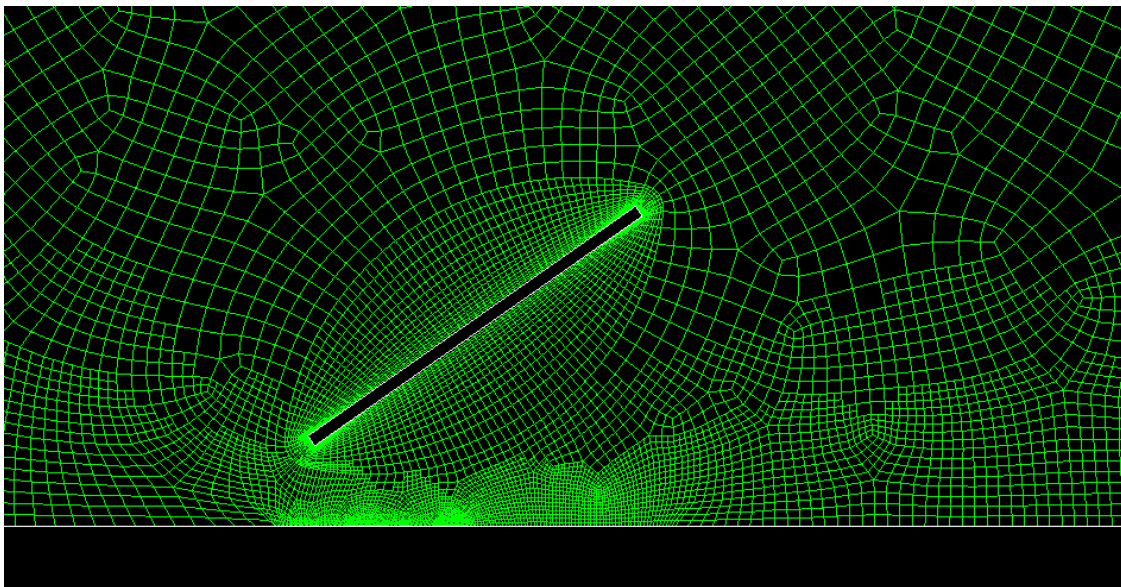


Figura 28. Detalle de la malla tras ser refinada

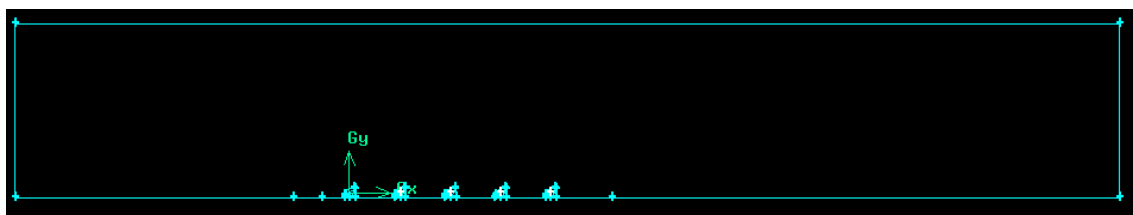


Figura 29. Dominio computacional completo en 2D

Para que el flujo incidente se pueda desarrollar apropiadamente, se ha dejado un espacio de 60 metros delante del primer panel. De la misma manera se ha dejado un espacio de más de 90m

aguas abajo y de 30 metros por encima para garantizar que la proximidad de los límites del dominio computacional no afecte al flujo. Estas dimensiones han sido obtenidas basándose en el citado trabajo.

Para el mallado, se ha recurrido a elementos cuadrangulares irregulares.

#### 4.3.4.Casos en 3D. Viento frontal

Se ha partido de una malla bidimensional rectangular (Quad/Map), haciéndola más compacta en las zonas cercanas a los paneles, y menos densa conforme aumenta la distancia, tal y como se aprecia en la Figura 30.

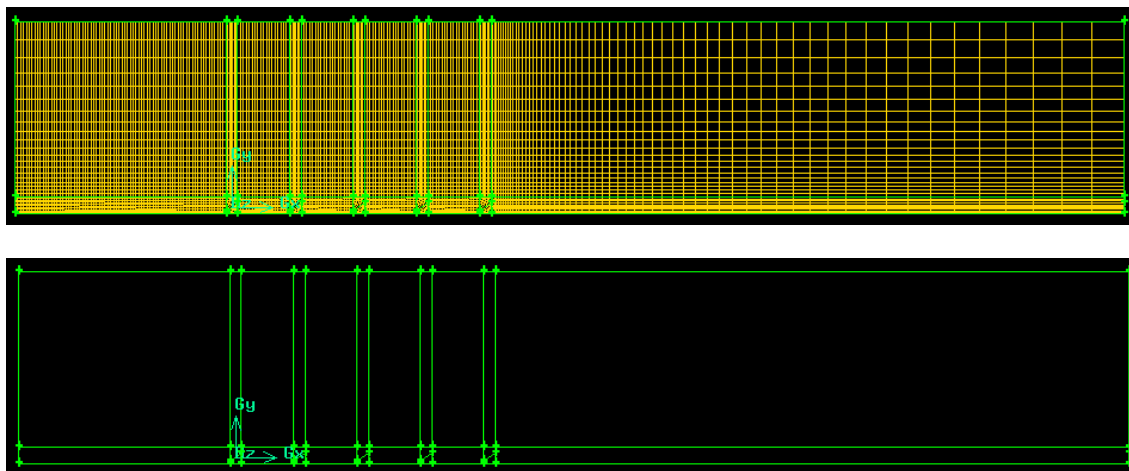


Figura 30. Dominio computacional mallado y sin mallar.

En la parte más cercana a los paneles no ha sido posible mantener esta malla estructurada, siendo necesario emplear elementos cuadriláteros deformados de tipo Quad/Pave (Figura 32).



Figura 31. Perfil de 5 paneles

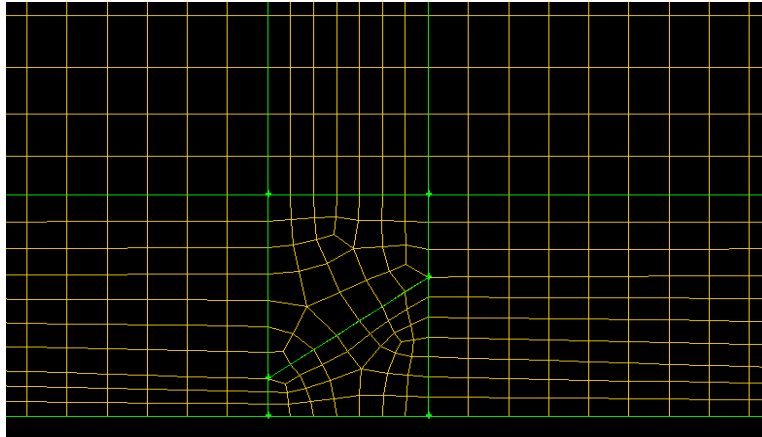


Figura 32. Detalle de un panel y del mallado inicial en su entorno.

Para convertir esta malla bidimensional en tridimensional, se ha extruido con elementos ortogonales. En aquellas partes donde la malla 2D no era estructurada, se han empleado elementos WEDGE.

Aunque cada fila de paneles está formada por 13 unidades, se ha aplicado simetría para disminuir el dominio computacional a la mitad y ahorrar tiempo de cálculo, dibujando 6 paneles enteros y un medio panel para cada fila.

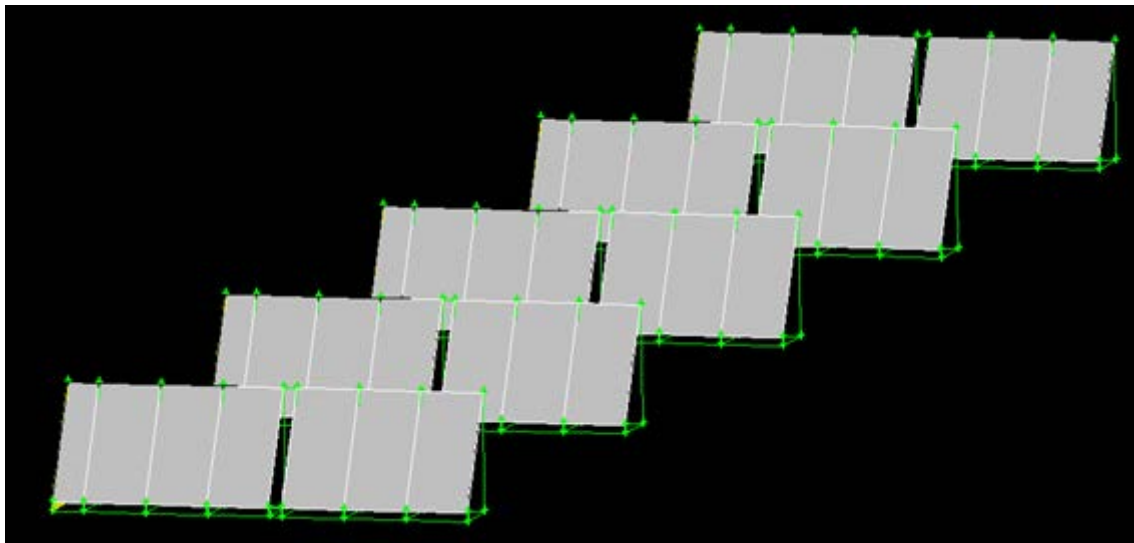


Figura 33. Situación de paneles en simulaciones 3D con viento frontal (simetría).

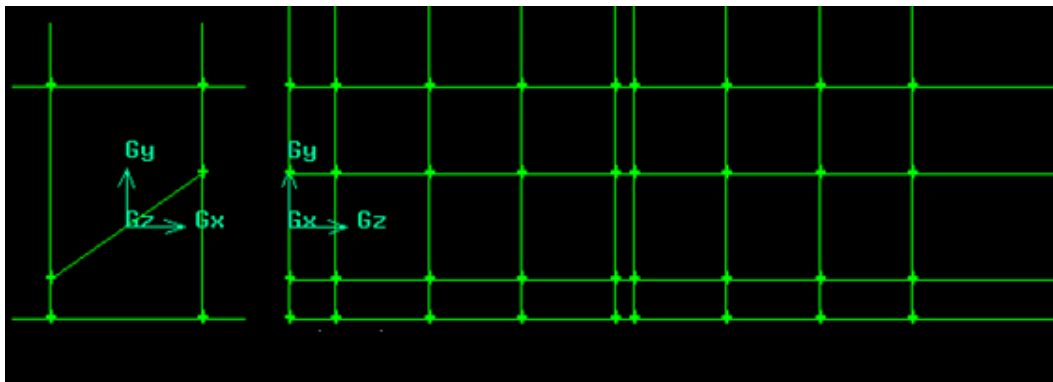


Figura 34. Perfil y alzado de los paneles de la Figura 33.

#### 4.3.5. Casos en 3D. Viento cruzado

A partir de la malla del caso de 3D con viento frontal, se ha generado la de viento cruzado girando los paneles y aumentando el dominio computacional.

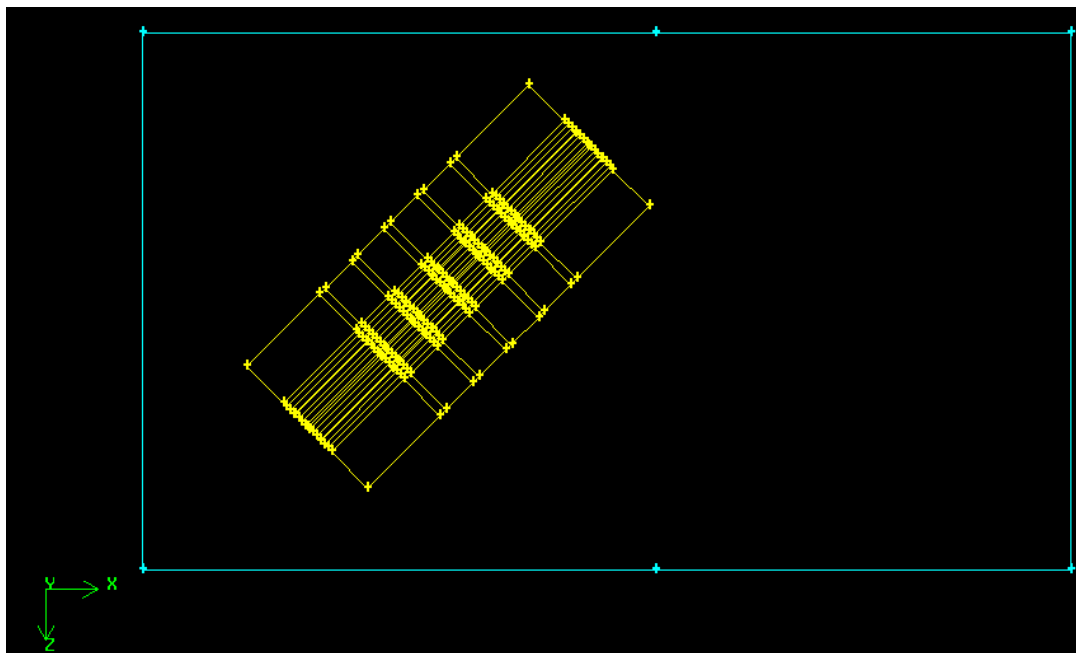


Figura 35. Vista en planta del dominio computacional para viento cruzado.

En este caso se ha recurrido a un dominio computacional mucho mayor que en casos anteriores para evitar que el flujo se vea alterado por sus límites. Las estelas previstas en estas simulaciones tienen un desarrollo más largo y turbulento en el espacio.

#### 4.4. Hipótesis de simulación en FLUENT. Condiciones de contorno y modelo de turbulencia.

Para la configuración de los diferentes parámetros de FLUENT, se va a seguir en este documento el mismo orden que plantea FLUENT en los menús de su GUI (Interfaz Gráfica de Usuario).

##### 4.4.1. Solver

- Solver: Pressured based. Indicada para fluidos incompresibles o sometidos a pequeñas variaciones de densidad.

- Gradient Option: Green-Gauss Cell Based. Algo mejor para el cálculo de coeficientes de resistencia.
- Time: Steady. En este trabajo no se estudian casos transitorios.
- Porous Formulation: Superficial Velocity
- Energy Equation: Activada

#### 4.4.2. Viscous model

- Model: k-epsilon (2eqn)
- Near-Wall Treatment: Non-Equilibrium Wall Functions.

#### 4.4.3. Operating Conditions

- Pressure: 101325Pa

#### 4.4.4. Condiciones de contorno

- Entrada: Velocity Inlet
  - o Velocity: 20/25/30/42m/s (absolute) según caso
  - o Temperature: 300K
- Salida: Pressure Outlet
  - o Gauge Pressure: 101325Pa
- Suelo: Wall
  - o Stationary Wall
  - o Shear Condition: No Slip
  - o Roughness Height: 0m (Suposición de suelo liso)
- Paneles:
  - o Stationary Wall
  - o Shear Condition: No Slip
  - o Roughness Height: 0m (Suposición de panel liso)
  - o Temperature: 300/350K según caso
- Fluido: fluid
  - o Material: air
  - o Density: 1.19 (constante)
  - o Cp: 1006.43J/(kgK)
  - o Viscosity: Sutherland

#### 4.4.5. Control de la solución

- Pressure Velocity Coupling: SIMPLE
- Under-Relaxation Factors
  - o Pressure: Standard
  - o Momentum: Second Order Upwind
  - o Turbulent Kinetic Energy: First Order Upwind
  - o Turbulent Dissipation Rate: First Order Upwind
  - o Energy: First Order Upwind
  - o

#### 4.5. Procesado de resultados

Una vez realizadas las simulaciones, en primer lugar se han extraído los siguientes datos directamente de FLUENT:



- Fuerzas sobre los paneles:
  - o En la dirección del eje X
  - o En la dirección del eje Y
  - o En la dirección del eje Z

Con esta información ha sido posible obtener la fuerza global ejercida por el viento sobre cada panel. También se han calculado los coeficientes de resistencia para cada eje y para la fuerza global.

- Momentos de giro sobre los paneles respecto al eje Z

El momento de giro, junto con los valores de fuerza anteriores, permite calcular el punto equivalente de aplicación de la fuerza (el punto del panel en el que, si se aplica la fuerza total del viento sobre el panel, produce ese momento de giro ).

Para facilitar la labor se ha recurrido a archivos \*.journal con instrucciones para copiar todos los datos de interés en documentos de texto.

En segundo lugar, con ayuda de Matlab y excel, se han procesado y generado gráficos y tablas.

En el caso de las simulaciones con viento cruzado, al haber realizado el giro de los paneles durante el proceso de creación de las mallas en GAMBIT, los ejes de coordenadas absolutos no coinciden con la orientación de los paneles. Es por ello que, a los datos extraídos de Fluent, se les ha realizado un cambio de coordenadas para obtener los resultados expuestos en este documento.

#### 4.6. Tratamiento de resultados

Tras realizar todas las simulaciones se han volcado los resultados de estas en hojas de Excel para facilitar su tratamiento. De cada simulación se han extraído los siguientes datos:

- Fuerza ejercida por el viento sobre cada uno de los paneles, en sus tres componentes (x,z,y)
- Momento de giro producido por el flujo sobre cada uno de los paneles (eje z)

Empleando la ecuación (Ec. 24) puede obtenerse el coeficiente de resistencia en cada una de las direcciones (x,z,y).

La fuerza incidente sobre el panel es descompuesta en dos fuerzas (tres en el caso de simulaciones con viento cruzado): una perpendicular a la superficie del panel y una/dos paralela(s) a dicha superficie.

Como ya se mencionó, la fuerza perpendicular con la ecuación (Ec. 28) y el momento de giro, permite obtener el punto de aplicación de la resultante.

Cada caso simulado contenía un numero variable de 5 paneles (casos en 2D), 35 paneles (casos en 3D con 5 filas y 7 paneles por fila) o 65 paneles (casos en 3D con viento cruzado, 5 filas, y 13 paneles en cada fila). En total se han realizado 280 simulaciones obteniéndose diferentes variables – fuerzas, momentos, calor cedido, etc - de 9820 paneles en total. Como no es manejable ni práctico reflejar toda esta información en el presente trabajo, se han realizado gráficas y comentado los casos más representativos y/o peculiares.

## 5. Casos de estudio

### 5.1. Simulaciones en 2D

En esta sección se estudia el caso en dos dimensiones. Solo hay 5 paneles y están separados entre sí una distancia de 9 ó 12m. La numeración de los 5 paneles corresponde a cada una de las 5 filas de paneles de la instalación, siendo el panel número 1 el expuesto directamente a la corriente de aire, y el número 5 el que está más aguas abajo.

#### 5.1.1. Coeficiente de resistencia

La Figura 38 y la Figura 39 muestran el coeficiente de resistencia global para vientos de 42m/s, en función del ángulo de ataque de los paneles. Diversas observaciones se pueden extraer de estas gráficas:

- Posición del panel:
  - La primera fila, expuesta directamente al viento, presenta siempre un coeficiente  $C_d$  mucho mayor
- Ángulo de ataque:
  - En la primera fila el  $C_d$  es elevado para ángulos grandes, y pequeño conforme se acerca a cero. Pero por el contrario, es remarcable el comportamiento inverso en el resto de las filas con valores elevados para un ángulo pequeño de  $10^\circ$ .
- Separación entre filas:
  - Un desplazamiento de 3m, provocado por separar las filas desde 9 hasta 12 metros, genera una reducción muy importante de los esfuerzos soportados por la primera fila de paneles. En algunos casos, esta reducción es de más del 25%.

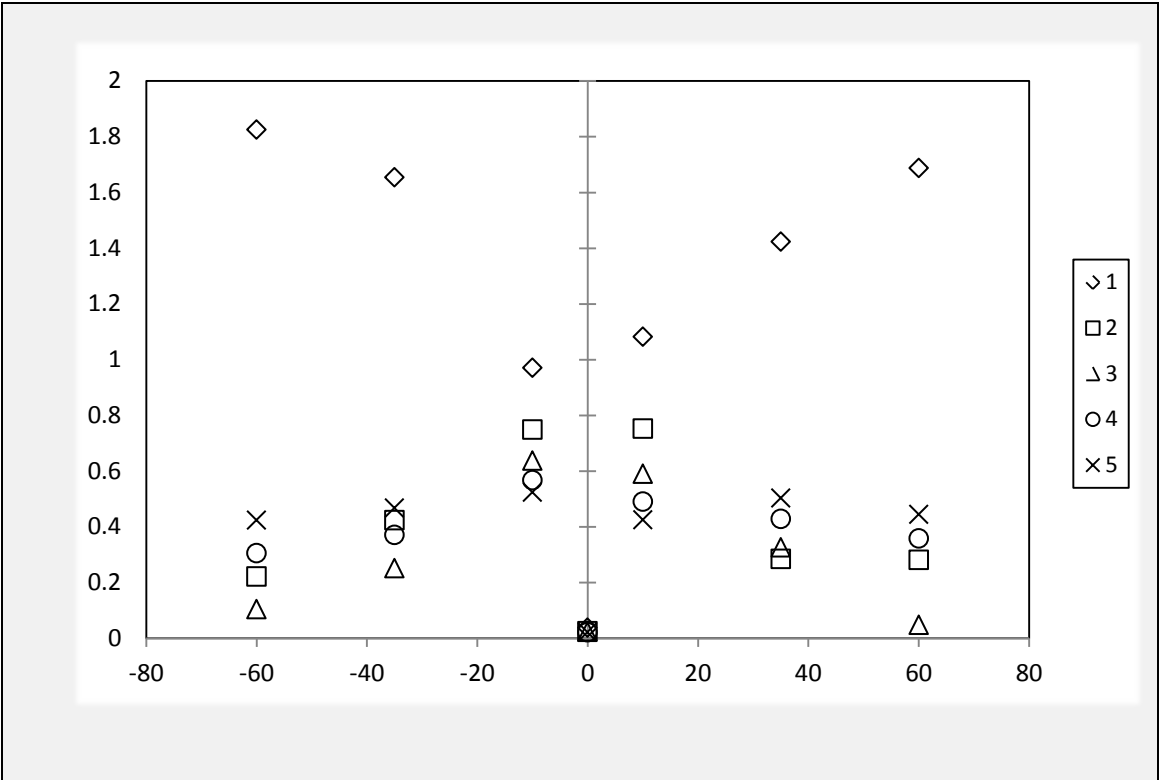


Figura 36.  $C_f$  según ángulo de ataque. Viento de 20m/s. Separación de 9m

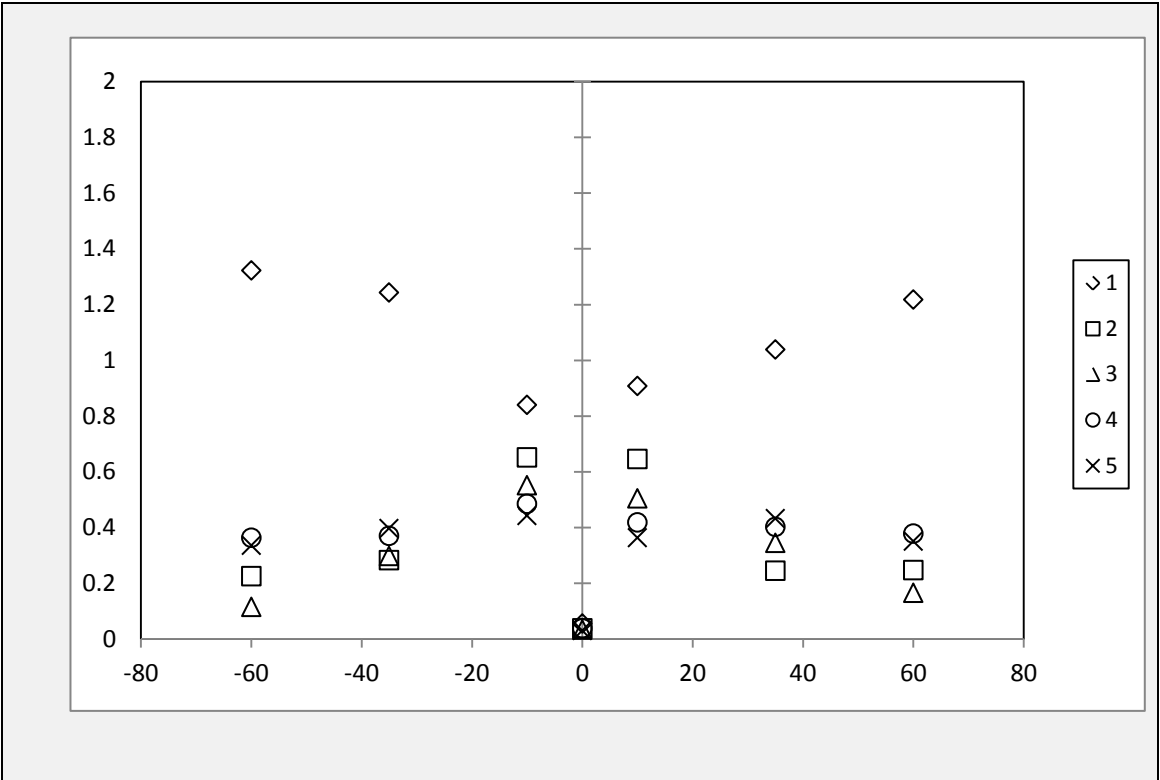


Figura 37.  $C_f$  según ángulo de ataque. Viento de 20m/s. Separación de 12m

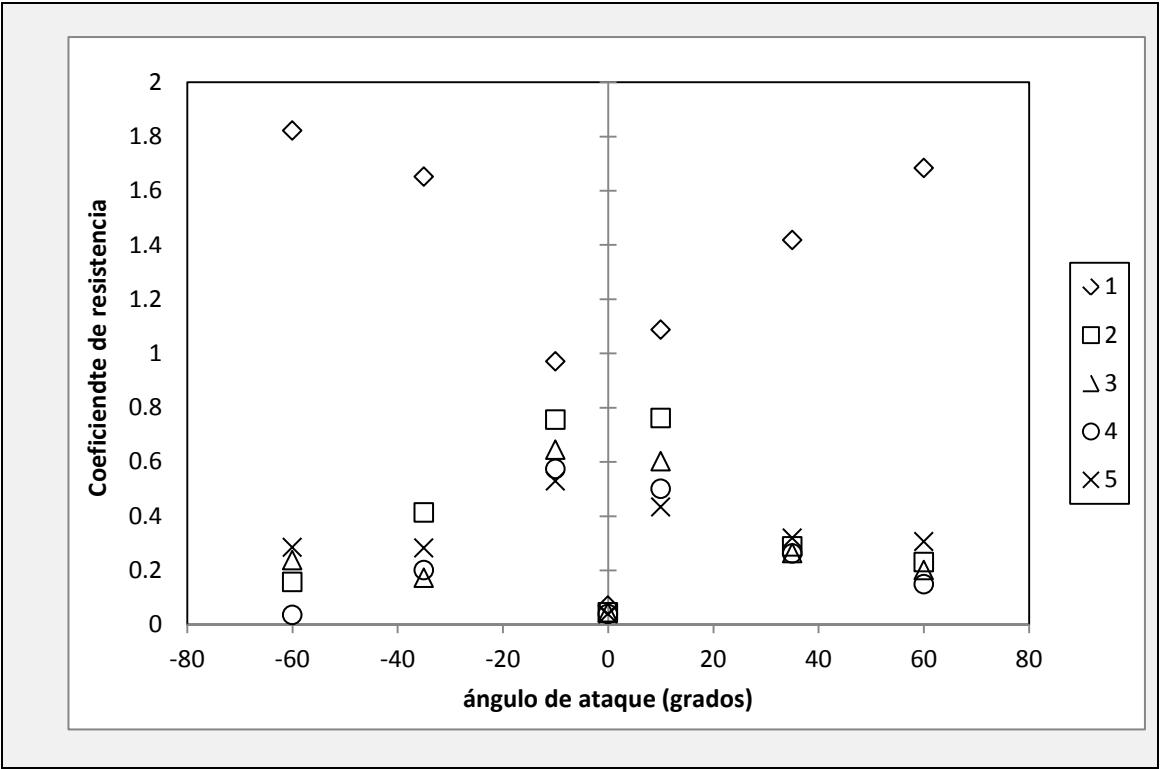


Figura 38. Cf según ángulo de ataque. Viento de 42m/s. Separación de 9m

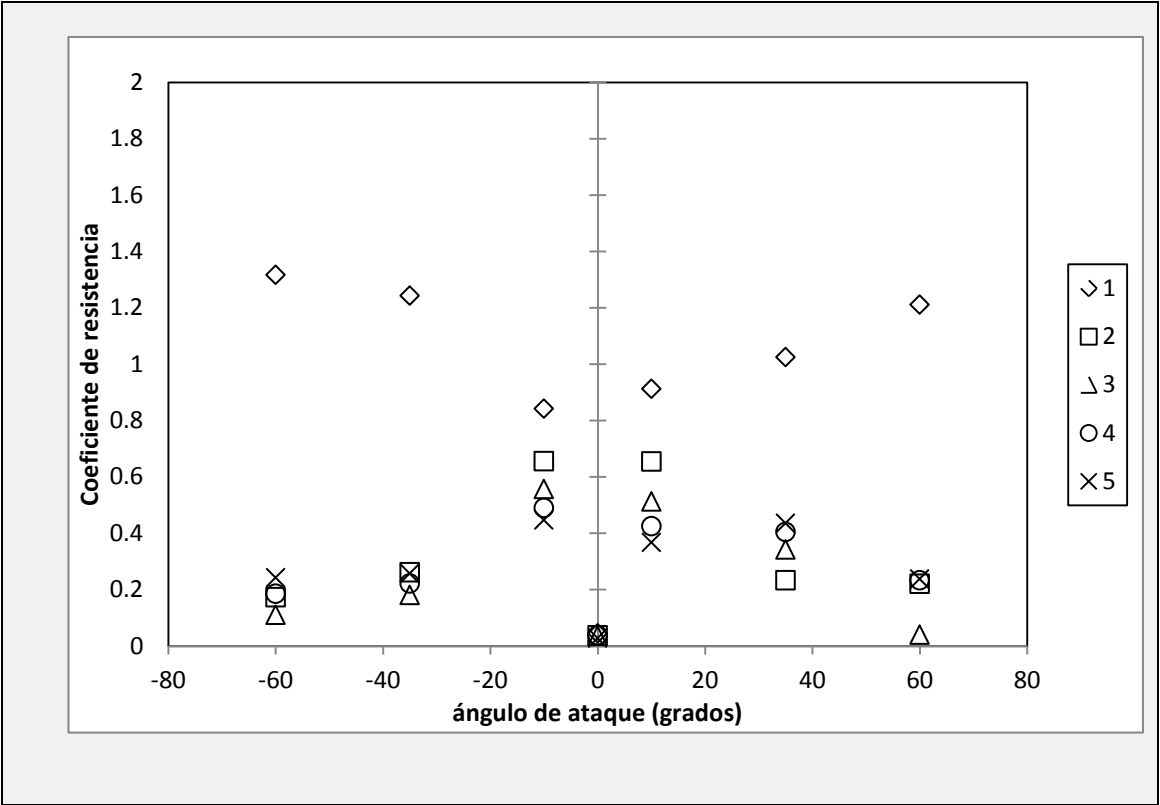


Figura 39. Cf según ángulo de ataque. Viento de 42m/. Separación de 12m

## 5.2. Simulaciones en 3D con viento frontal

En este apartado se ha simulado la instalación con un viento frontal. Por sencillez y, debido a la simetría, sólo se ha dibujado media malla. Tal y como muestra la Figura 40, el panel número 1 es el panel central de la instalación, y el número 7 el más externo.

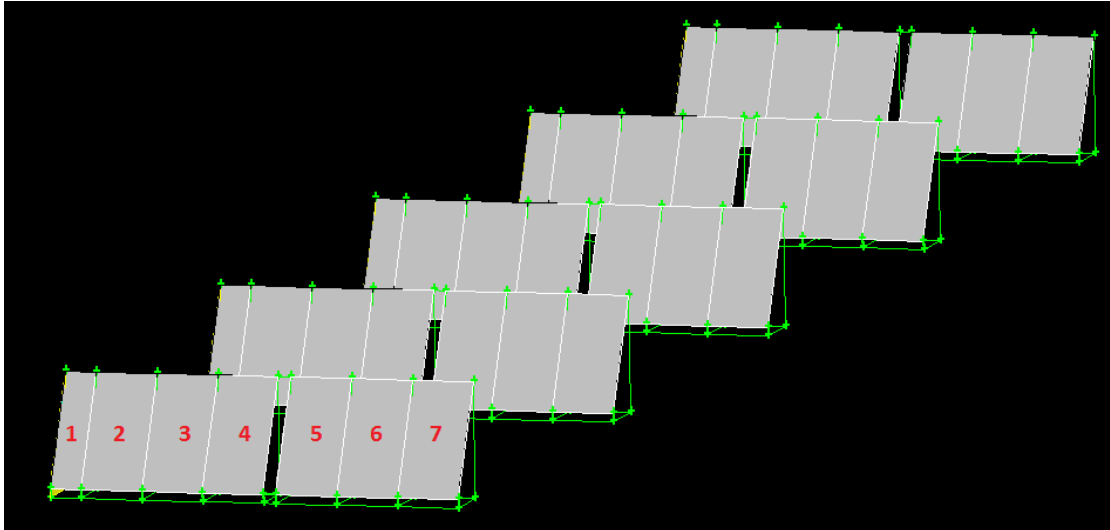


Figura 40. Situación de los paneles y numeración de estos.

### 5.2.1. Coeficiente de resistencia

En este apartado se da una visión global del coeficiente de resistencia para todas las filas.

En la Figura 41 puede verse el coeficiente de resistencia en una instalación con 5 filas de paneles separadas entre sí y sometidas a un viento máximo de 42m/s. La imagen superior corresponde a una orientación de  $-60^\circ$ , y la inferior de  $+60^\circ$ .

Es resaltable el comportamiento de los paneles más externos (5, 6 y 7), con coeficientes de resistencia más elevados en términos generales. Del mismo modo en la Figura 42 se puede ver un comportamiento casi idéntico cuando las filas están separadas una distancia de 12m.

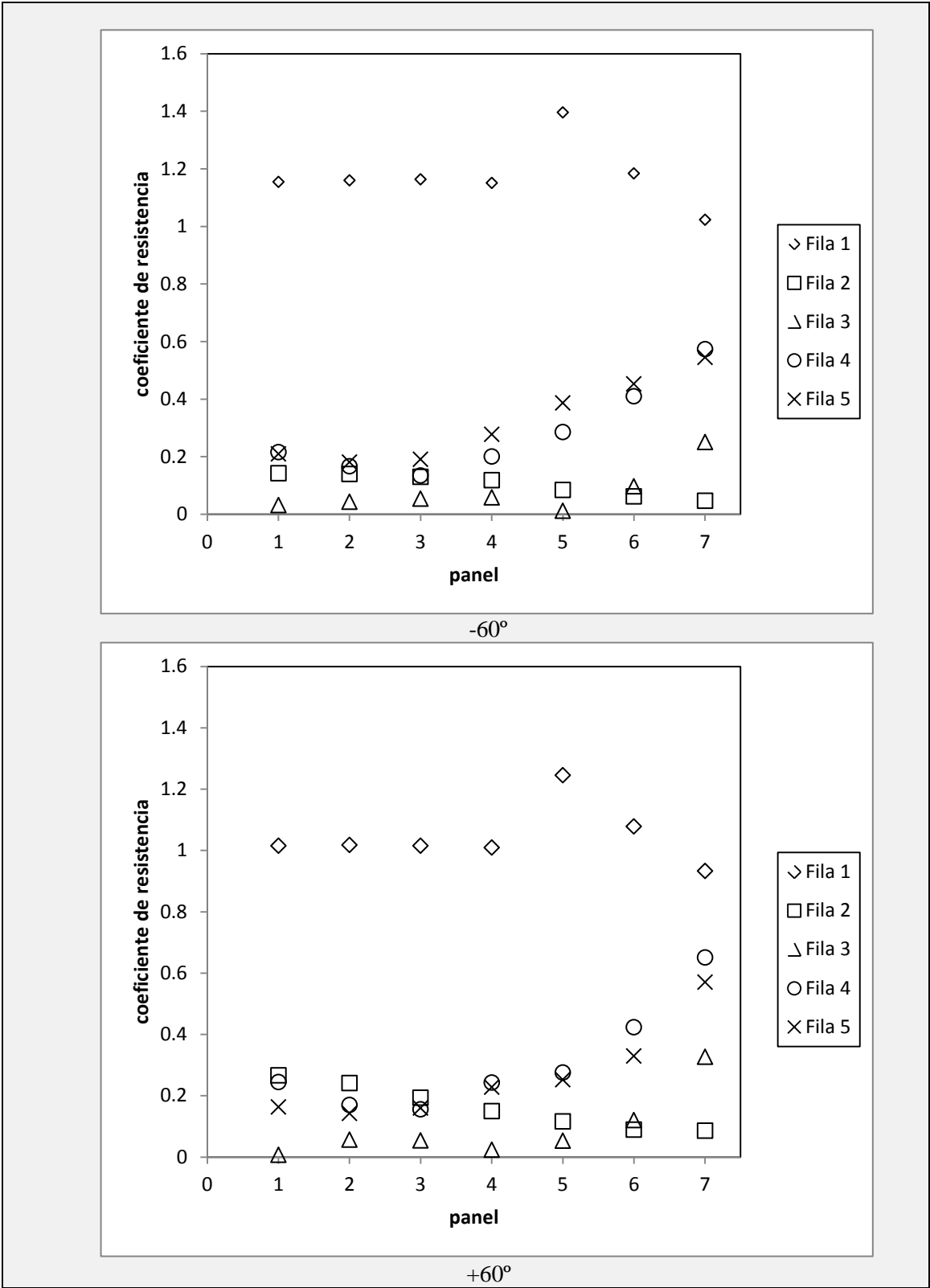


Figura 41. Cf. Viento de 42m/s y separación entre paneles de 9m.

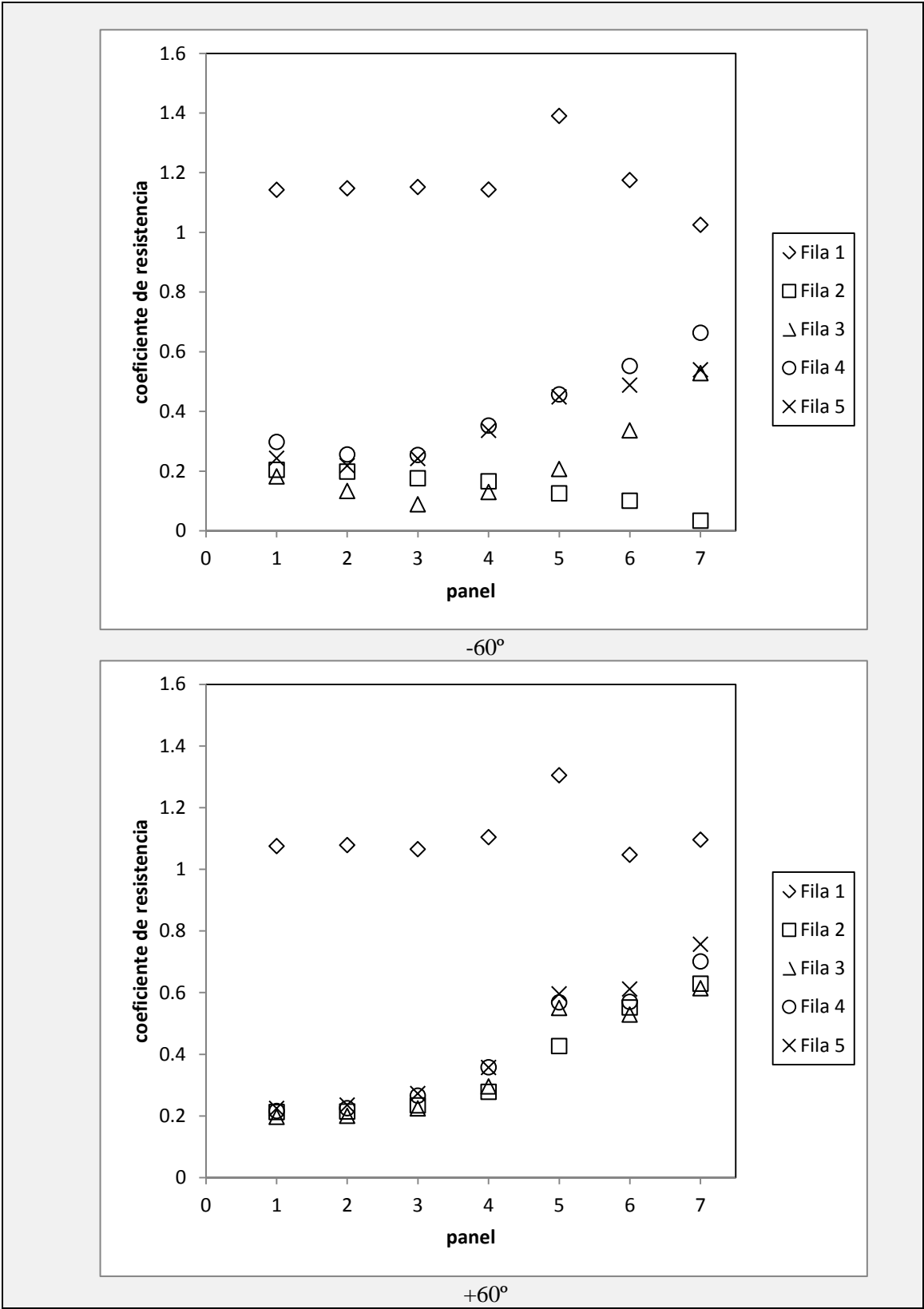


Figura 42. Cf. Viento de 42m/s y separación entre paneles de 12m.

### 5.2.2. Estudio de la primera fila de paneles. Coeficiente de resistencia.

Como es de suponer, y se ha visto en el apartado anteriores, los mayores coeficientes de resistencia se suelen producir en la primera fila de paneles al estar expuesta directamente al viento incidente. Por este motivo se ha decidido prestar más atención al estudio de dicha fila.

El hecho de centrar las siguientes páginas en la 1ª fila de paneles da la oportunidad de estudiar un poco más detalladamente el efecto que producen algunos parámetros en el comportamiento del flujo.

En la Figura 43 y la Figura 44 se muestra el coeficiente global de resistencia de dicha fila en diferentes condiciones:

- Separación entre filas de paneles:
  - o 9m, 12m
- Velocidades de viento distintas:
  - o 20m/s, 42m/s
- Ángulos diversos:
  - o  $-60^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $+10^\circ$ ,  $+60^\circ$



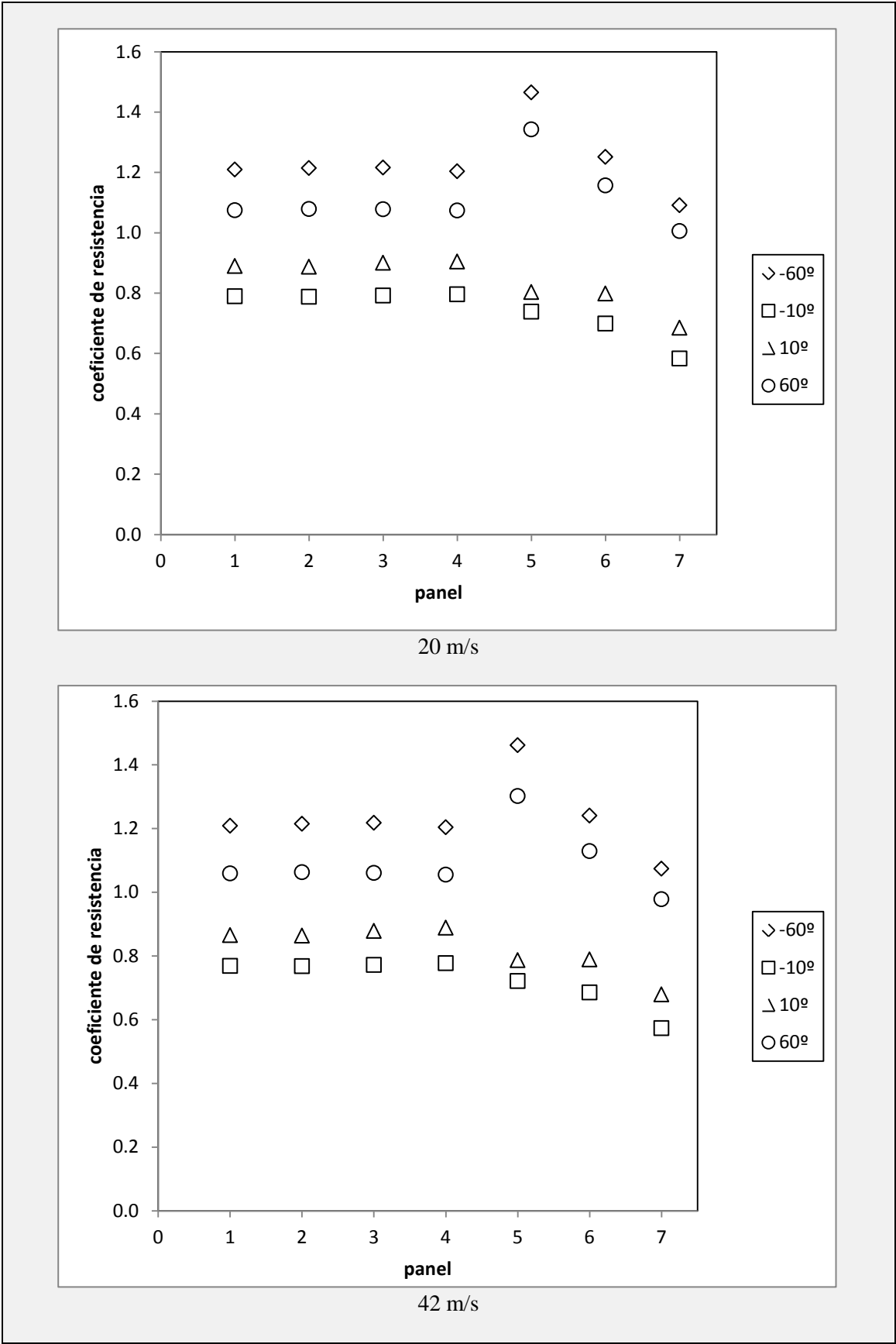


Figura 43. Cf en la primera fila. Separación de 9m.

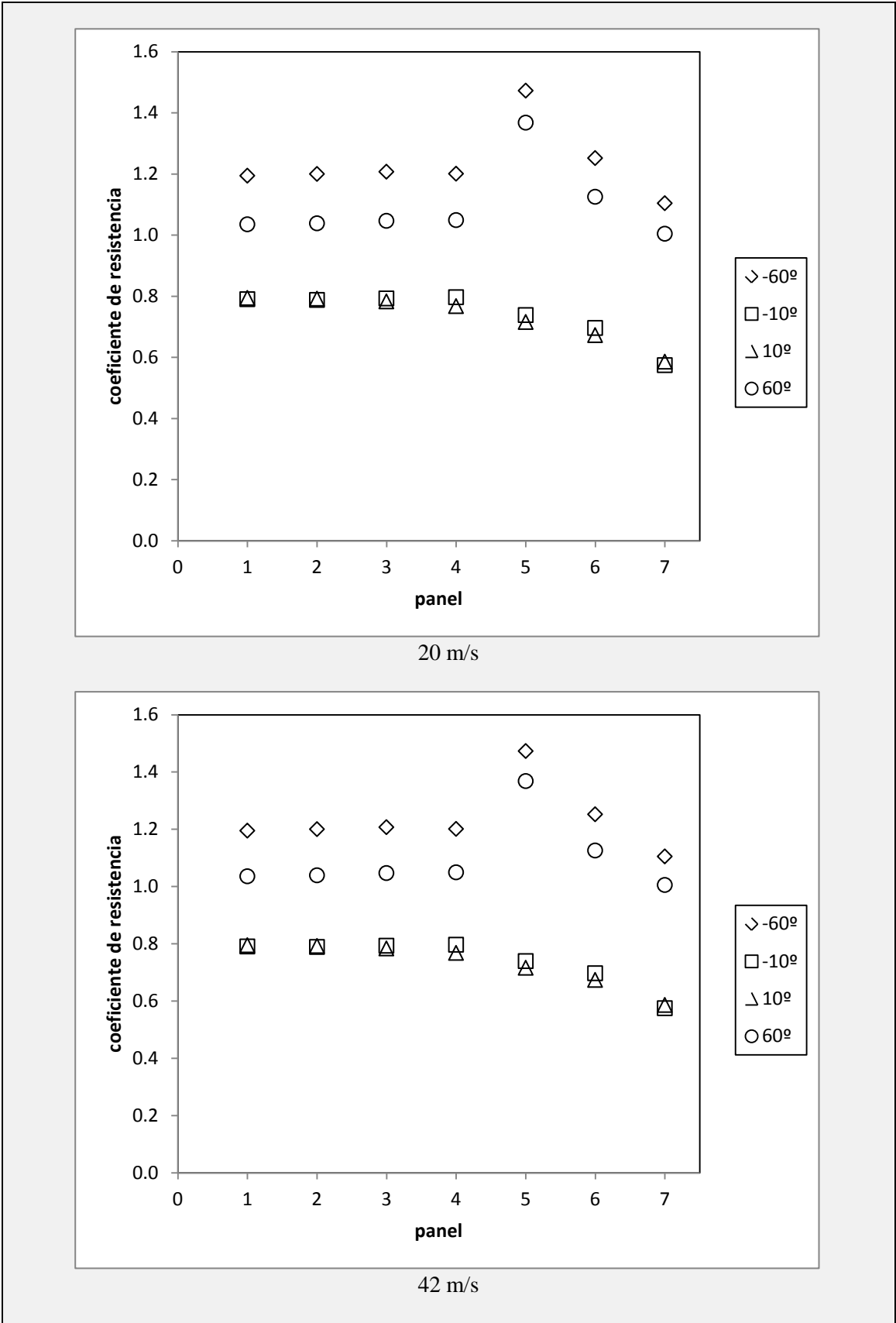


Figura 44. Cf en la primera fila. Separación de 12m.

Se puede observar fácilmente cómo afectan las variables anteriormente mencionadas al valor del coeficiente global de resistencia, pudiéndose extraer las siguientes conclusiones.

- La influencia de la separación de las filas no es significativa cuando se hace referencia a esta primera fila de paneles. El comportamiento es prácticamente idéntico con una distancia de 9m que con una de 12m. Otra cosa es lo que ocurra en los paneles situados aguas abajo.
- La velocidad del viento tampoco genera cambios significativos en los coeficientes de resistencia. A 20 y 42m/s los coeficientes no sufren variación alguna, lo que confirma que la resistencia es debida al campo de presiones principalmente y los efectos de la resistencia de fricción son despreciables, incluso con ángulos de ataque pequeños.
- Como era previsible, el ángulo de ataque es el único factor que tiene mucha capacidad para cambiar el coeficiente de resistencia en la primera fila de paneles.
- Cabe resaltar la excepción producida a  $+10^\circ$ , siendo los  $C_f$  algo mayores cuando la separación entre filas es de 9m
- Los paneles laterales están sometidos a esfuerzos mayores. Mientras que los paneles centrales se comportan casi igual que en el caso bidimensional, los laterales son fuertemente influenciados por el efecto borde. Este efecto rompe el equilibrio a lo largo del eje Z que había en el caso bidimensional, alterando de un modo importante el flujo.

En el 5º panel de la primera fila se aprecia, en todos los casos, una variación importante en el valor de  $C_f$  causada por la alteración del flujo de aire al pasar por la oquedad existente entre los paneles 4 y 5. En estos paneles el flujo no pasa siempre por encima o debajo del panel, sino que una parte del flujo lo rodea cruzando libremente por esa oquedad entre paneles. Tras esto es desviado hacia el exterior produciendo turbulencias tras los paneles 5,6 y 7 como se puede ver en la **Figura 45**.

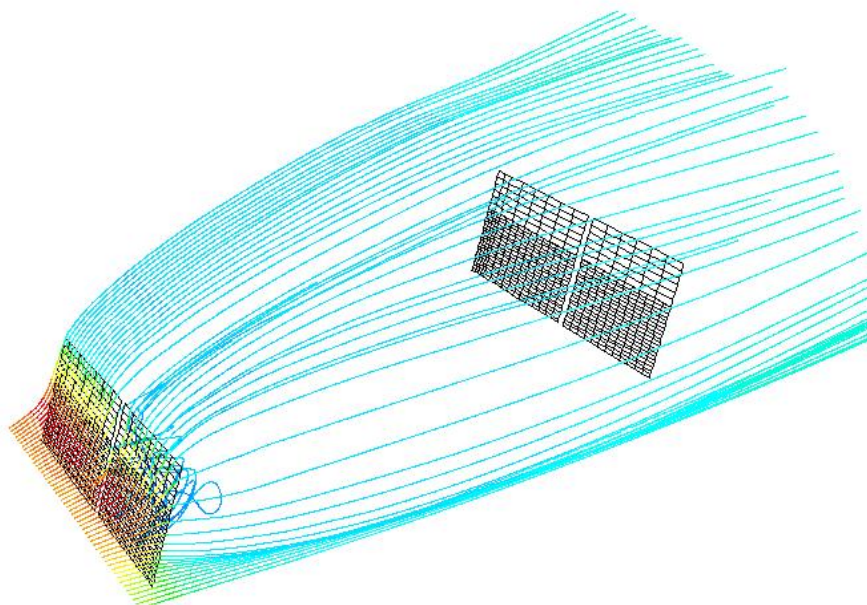
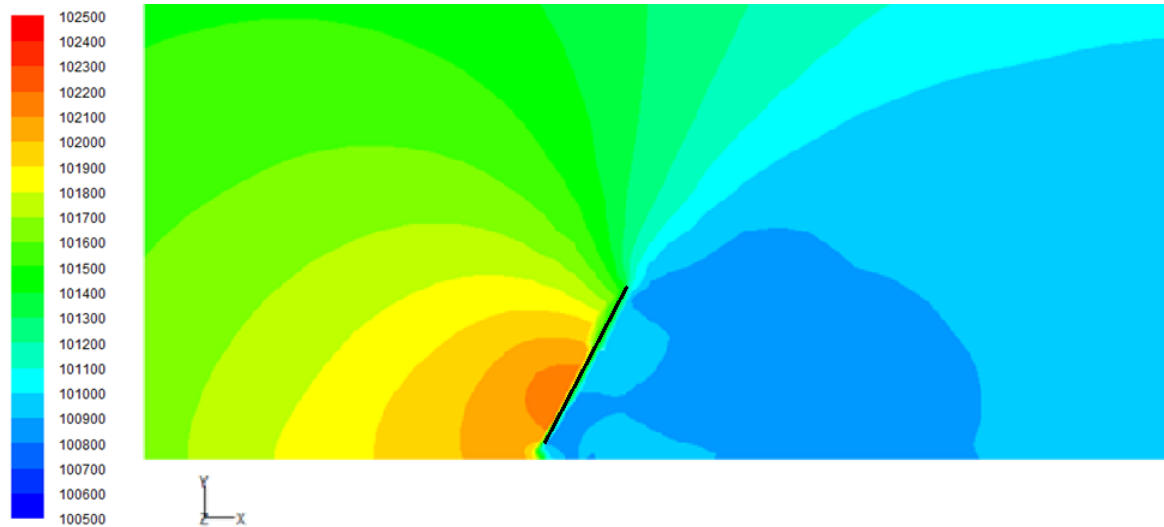
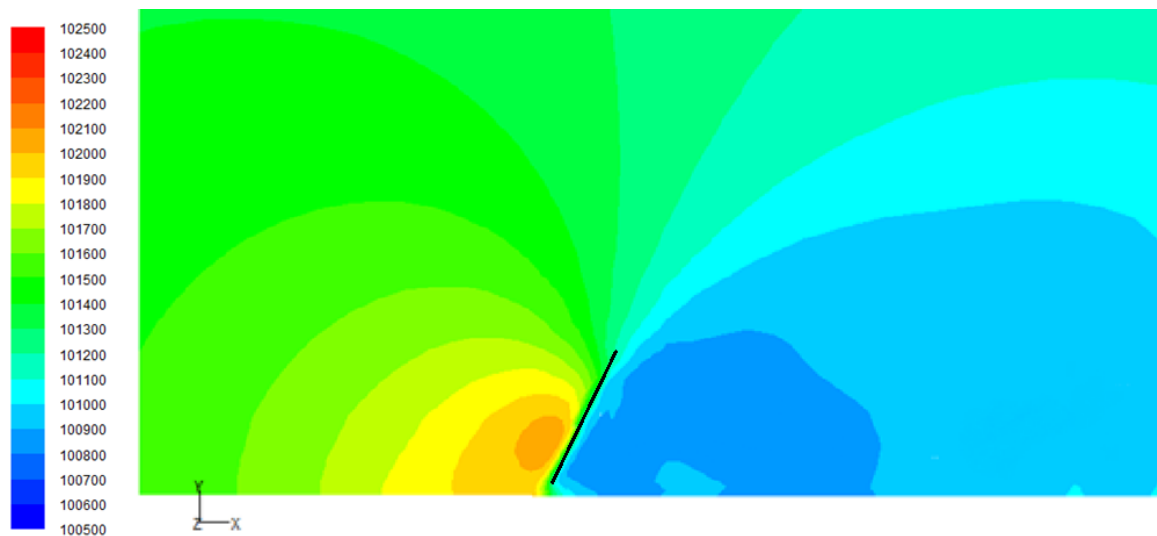


Figura 45. Trayectoria de algunas partículas a su paso por la primera fila de paneles. Se muestra sólo media fila de paneles al haber un plano de simetría en  $Z=0$ .

### 5.2.3. Campo de presiones

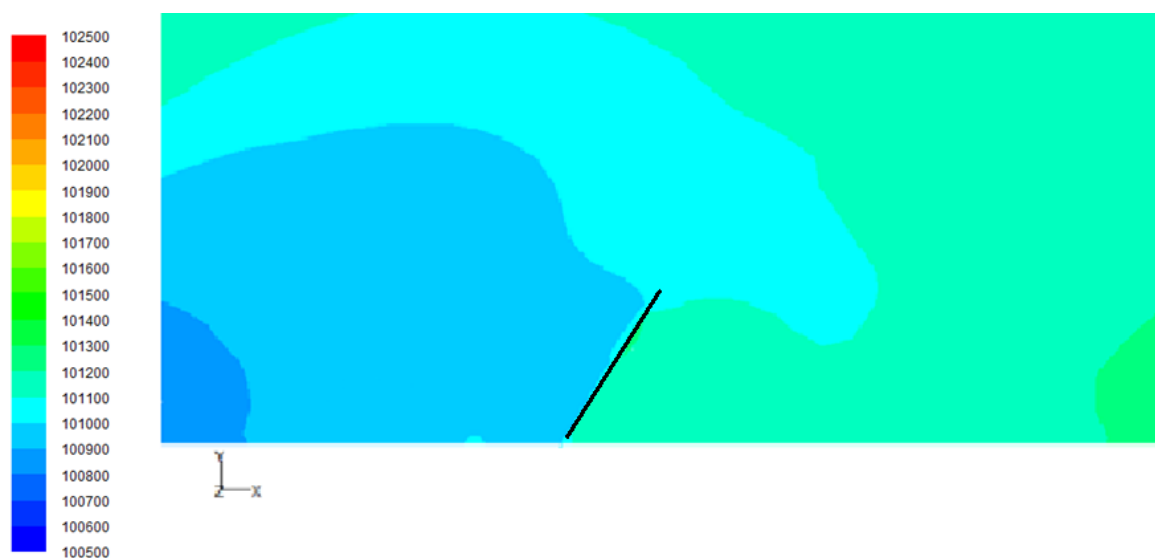


**Figura 46.** Campo de presiones. Detalle de la primera fila en el panel central. Distancia entre filas 9m. Ángulo de ataque  $+60^\circ$ .  $v=42\text{m/s}$ .

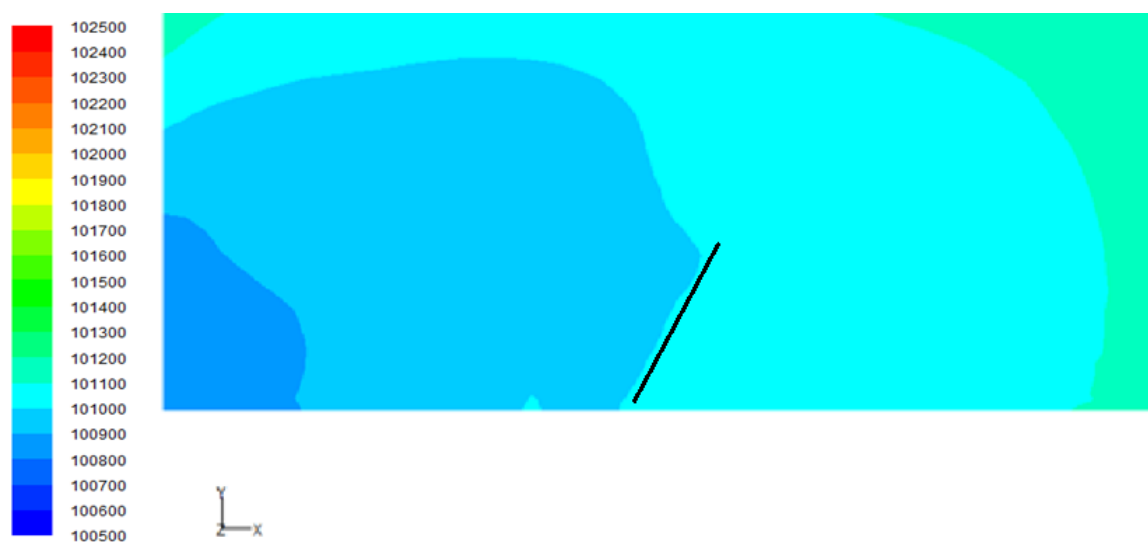


**Figura 47.** Campo de presiones. Detalle de la primera fila, oquedad entre paneles. Distancia entre filas 9m. Ángulo de ataque  $+60^\circ$ .  $v=42\text{m/s}$ .

La presión es, por norma general, mayor en la primera fila. También, debido a la apertura existente entre los paneles 4 y 5, se produce una disminución del gradiente de presiones en las proximidades.

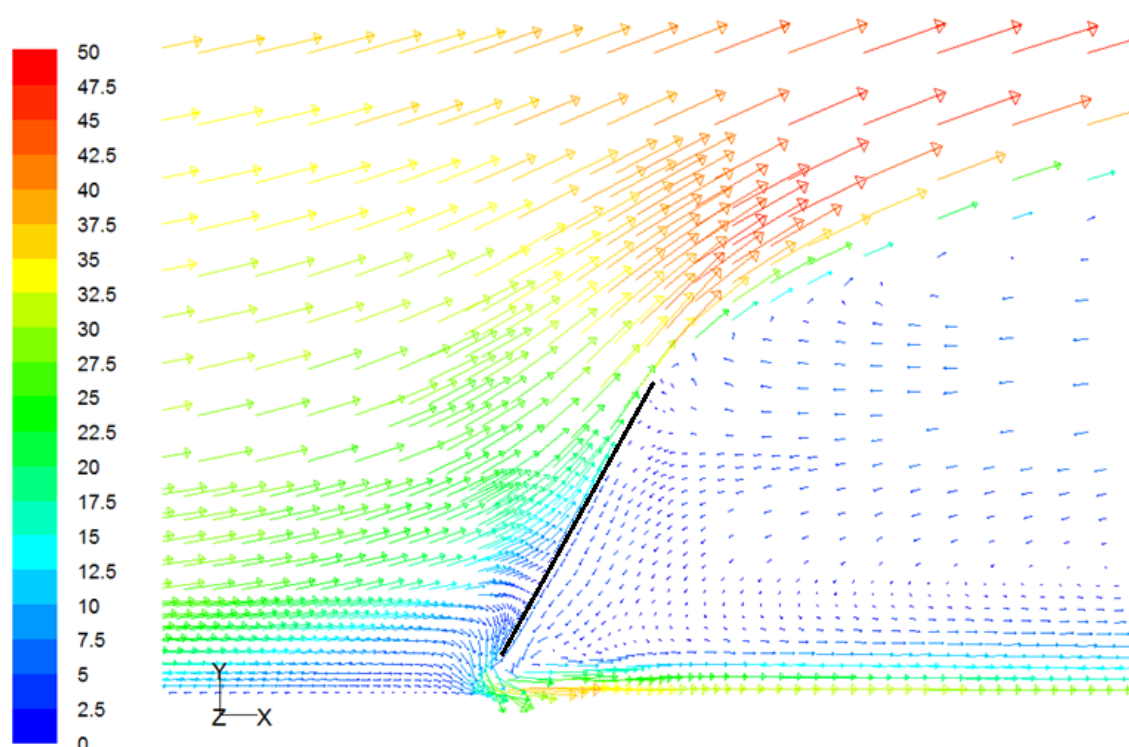


**Figura 48.** Campo de presiones. Detalle de la segunda fila, panel central. Distancia entre filas 9m. Ángulo de ataque  $+60^\circ$ .  $v=42\text{m/s}$

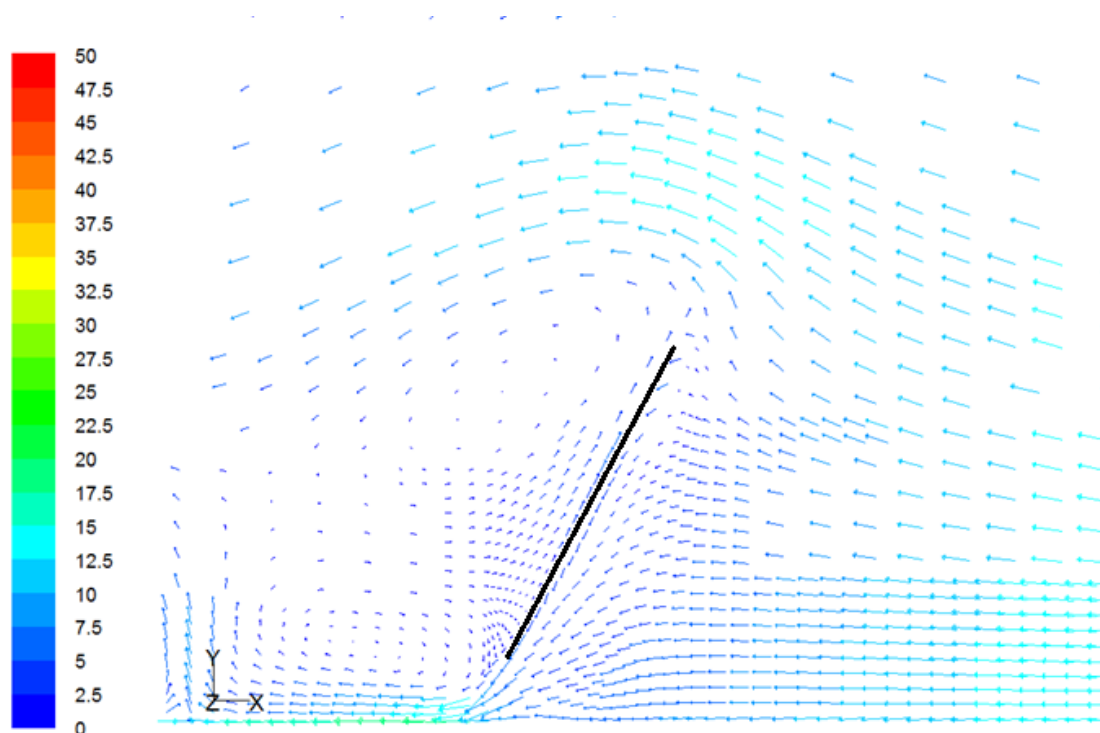


**Figura 49.** Campo de presiones. Detalle de la segunda fila, oquedad entre paneles. Distancia entre filas 9m. Ángulo de ataque  $+60^\circ$ .  $v=42\text{m/s}$

#### 5.2.4. Campo de velocidades

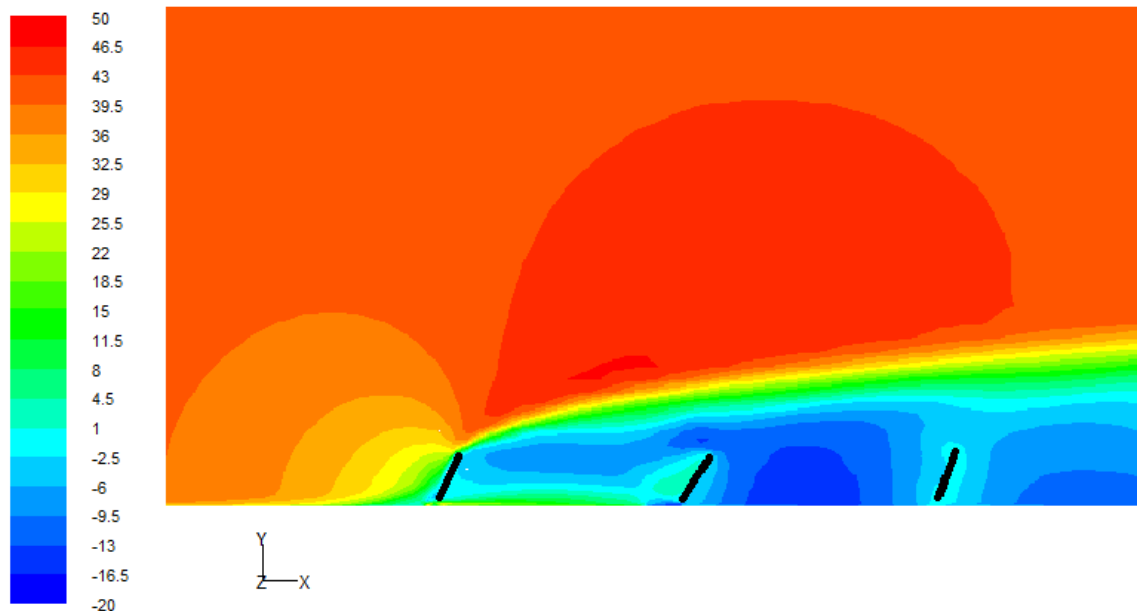


**Figura 50.** Campo vectorial de velocidades. Primera fila, panel central. Separación entre filas de 9m. Ángulo de ataque  $+60^\circ$ .  $v=42\text{m/s}$ .

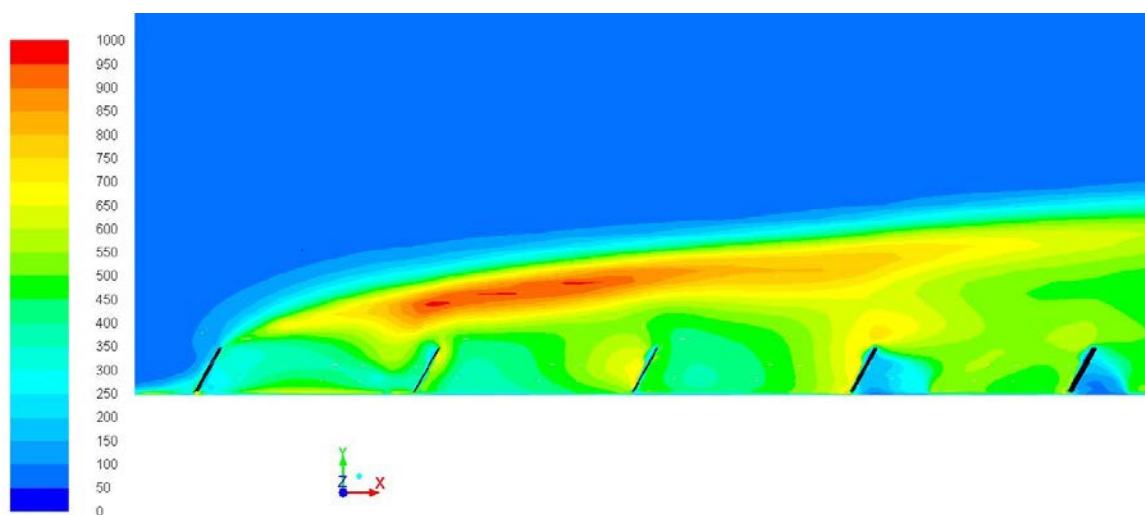


**Figura 51.** Campo vectorial de velocidad. Segunda fila, panel central. Separación entre filas de 9m. Ángulo de ataque de  $+60^\circ$ .  $v=42\text{m/s}$ .

En la segunda fila de paneles aparecen vectores con dirección opuesta al flujo. La explicación puede verse dibujando el perfil de velocidades en la dirección +X. El flujo de aire, tras impactar con el primer panel, es desviado hacia arriba sobrevolando varias filas de paneles. El vacío producido entre esta altura y el suelo es cubierto con un flujo secundario que circula en dirección opuesta (sentido -X).



**Figura 52.** Campo de velocidades en la dirección X. Paneles centrales. Separación entre filas de 9m. Ángulo de ataque de  $+60^\circ$ .  $v=42\text{m/s}$ . Se han señalado (en negro) las 3 primeras filas de paneles.



**Figura 53.** Intensidad turbulenta (%)

### 5.3. Simulaciones en 3D con viento cruzado

Tal y como se explicó anteriormente, se ha creado una malla que contiene todos los paneles (Figura 54) y se ha girado un determinado ángulo (45 ó 55 grados) tal y como muestra la Figura 55 para simular el viento incidente.

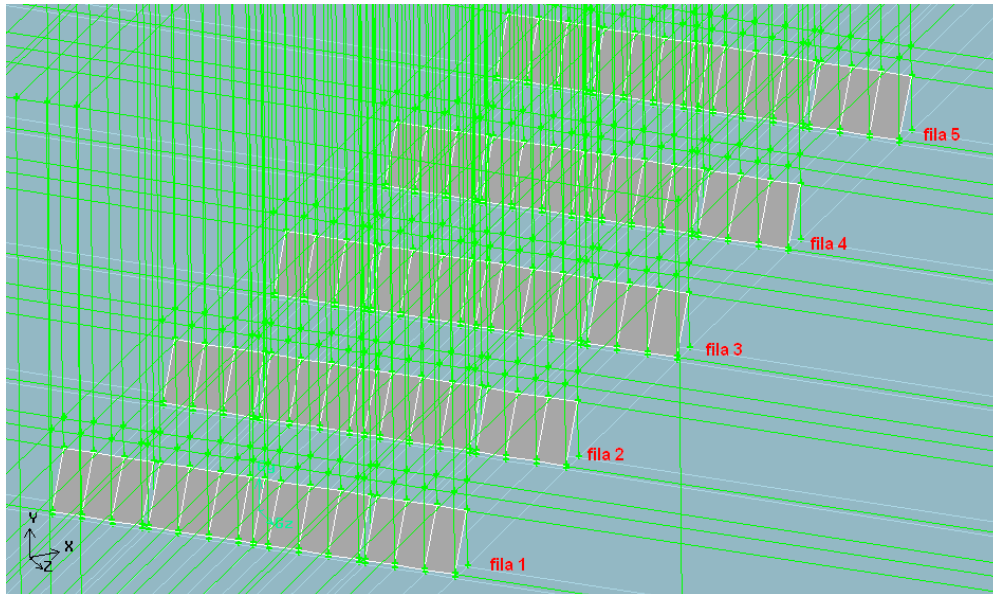


Figura 54. Disposición de los paneles con viento cruzado

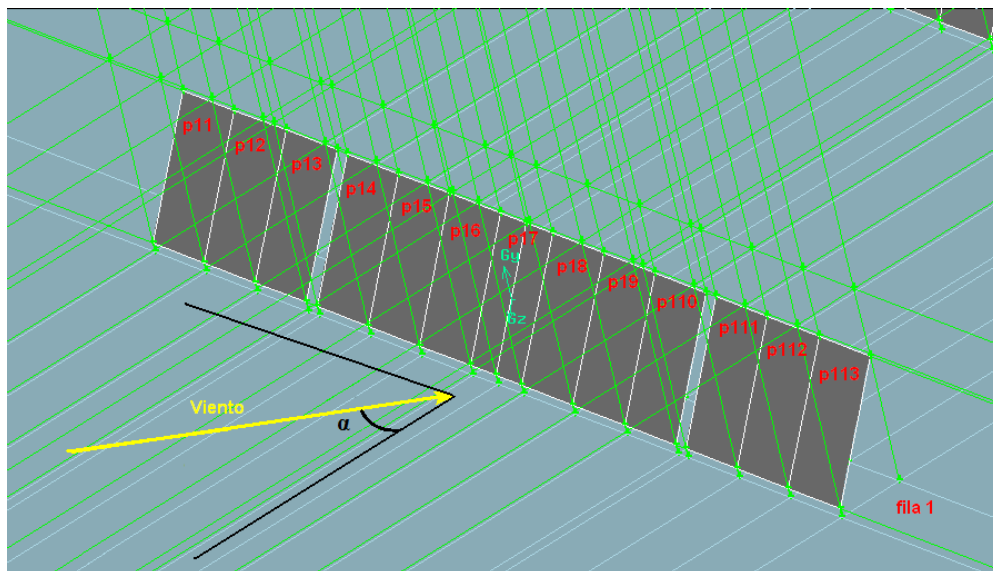


Figura 55. Numeración de los paneles (fila1) y ángulo de referencia. Simulaciones con viento cruzado.

En estos casos aparece una tercera componente de la fuerza en el eje Z que se sumará a las otras dos.

En estas simulaciones se ha seguido el mismo procedimiento para calcular las fuerzas y momentos de giro sobre los paneles.



El eje de coordenadas no está alineado con los paneles. Los valores de fuerzas dados por Fluent están referidos a dicho sistema de coordenadas, pero han sido trasladados a un sistema de coordenadas coincidente con los paneles. En el caso de los momentos de giro, se han definido los ejes de rotación con un vector paralelo al eje de giro de los paneles.

Viento cruzado a 45°:  $(\sin 45^\circ, 0, \cos 45^\circ)$

Viento cruzado a 55°:  $(\sin 55^\circ, 0, \cos 55^\circ)$

#### 5.3.1. Coeficiente de resistencia

Como era de esperar, un viento cruzado sobrecarga más unos paneles que otros, no habiendo una simetría a lo largo de la instalación como ocurre con el viento frontal.

Téngase en cuenta que, en el caso de viento frontal, el coeficiente  $C_f$  surge debido a dos fuerzas perpendiculares: una paralela al suelo, y otra perpendicular a este. Por el contrario, ante un viento cruzado surge una tercera fuerza lateral también paralela al suelo que empuja a algunos paneles sobre los colindantes.

En los casos bidimensionales vistos en la bibliografía, una placa plana no tenía un coeficiente de resistencia mayor de 2. Se puede observar en la **Figura 56** que algunos paneles superan el valor de 2.5, quizás por la aparición de fuerzas transversales que aumentan el valor absoluto de la fuerza sobre el panel.

Como ejemplo se muestra en la Figura 57 el campo de presiones de un plano paralelo al suelo, elevado 1 metro sobre este. Este plano contiene al eje de giro de los paneles. Además se han representado también algunas líneas de corriente con origen en dicho plano.

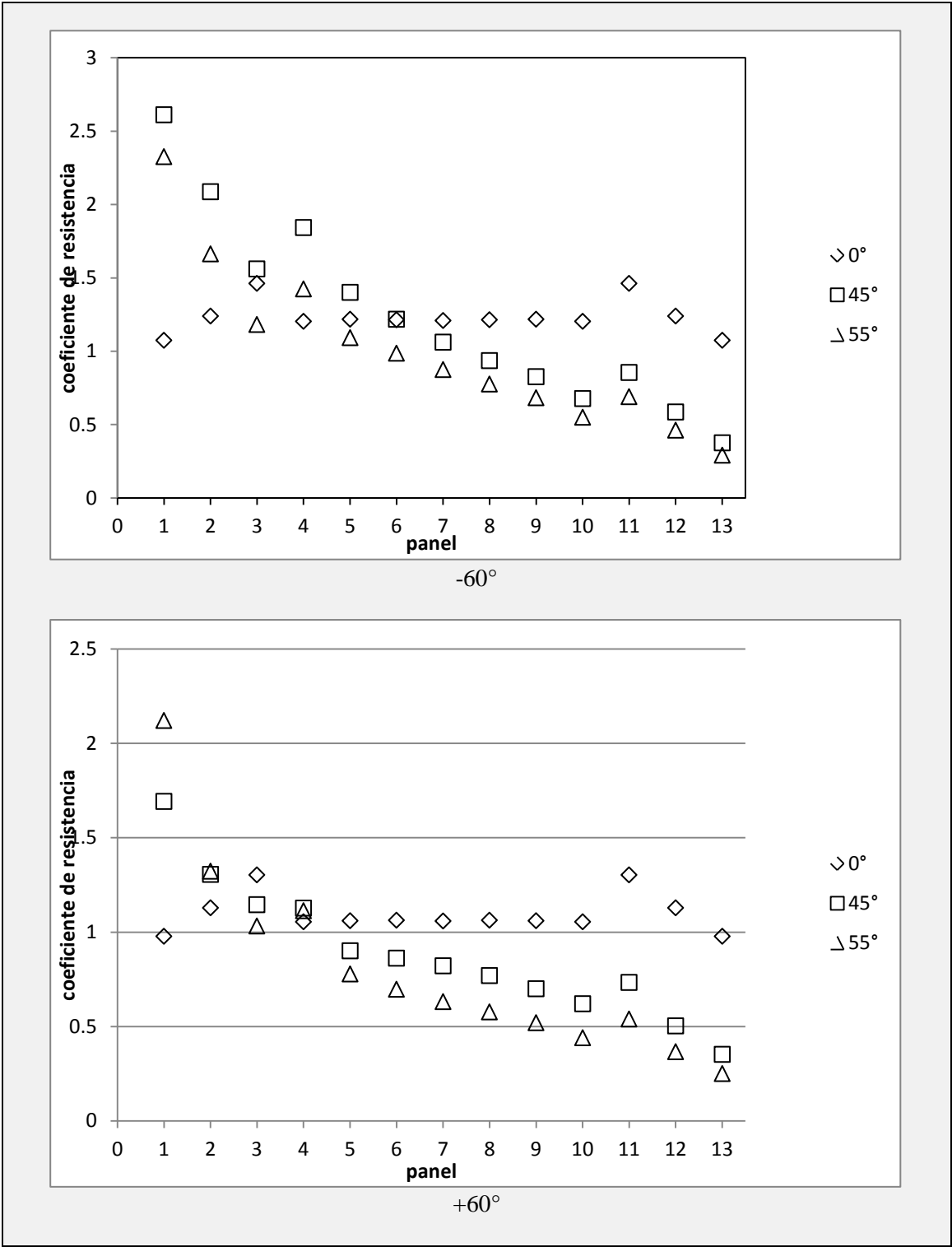


Figura 56. Valor de Cf en la primera fila. Viento frontal (0°) y cruzado (45° y 55°) de 42m/s. Separación entre filas de 9m.

### 5.3.2. Campo de presiones

Como ejemplo se muestra en la siguiente figura el campo de presiones de un plano paralelo al suelo, elevado 1 metro sobre este. Este plano contiene al eje de giro de los paneles.

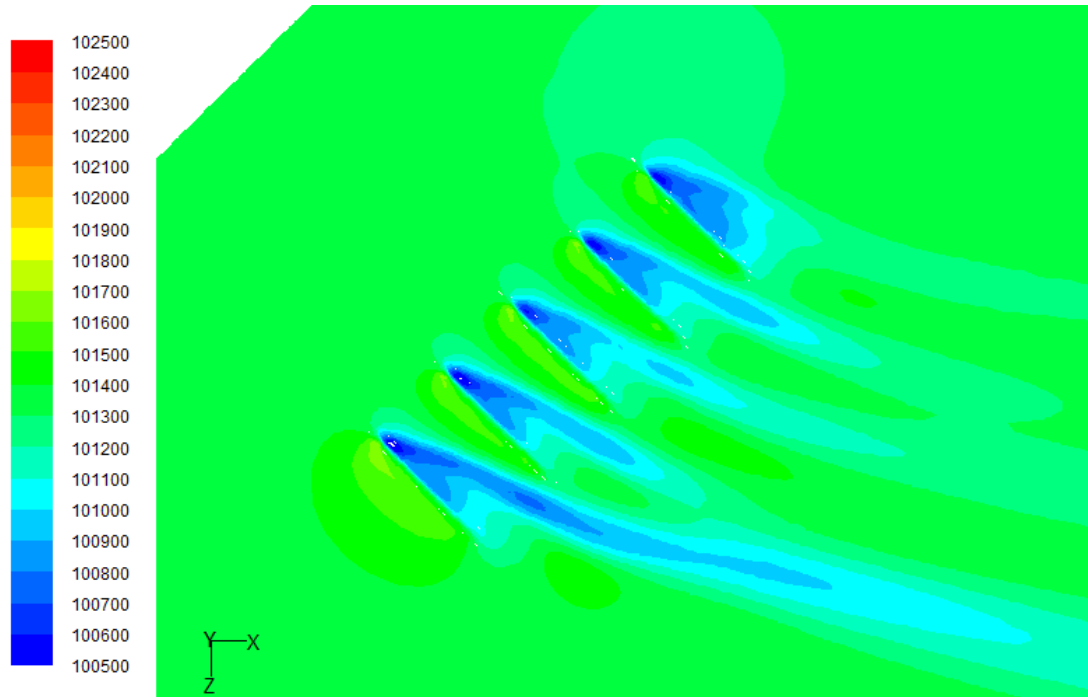


Figura 57. Campo de presiones. Viento cruzado a  $45^\circ$  y 42m/s. Separación entre filas de 9m. Paneles a  $+60^\circ$ . Vista en planta.

### 5.3.3. Campo de velocidades

Se ha representado en la Figura 58 el campo de velocidades también a un metro sobre el nivel del suelo, combinado con la trayectoria de varias partículas. La velocidad se hace máxima en el borde del primer panel de cada fila, intentando el flujo esquivar el obstáculo de los paneles.

Puede apreciarse cómo el flujo linear incidente es transformado en una serie de vórtices aguas abajo de los paneles. También es reseñable cómo el flujo es desviado en la dirección del eje +Z, produciendo una fuerza en sentido opuesto sobre los paneles.

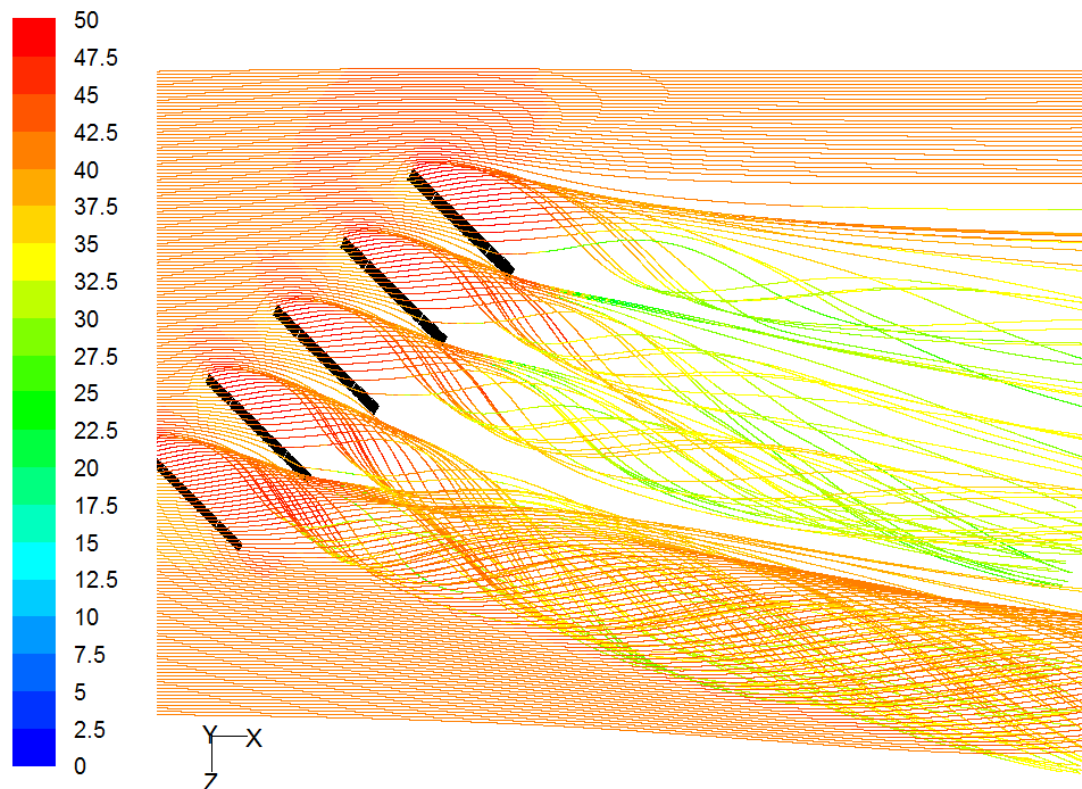


Figura 58. Viento cruzado a 45° y 42m/s. Separación entre filas de 9m. Paneles a +60°. Vista en planta.

## 6. Conclusiones

### Conclusiones generales

Se ha realizado una revisión bibliográfica con la finalidad de obtener métodos y modelos que permitan determinar las cargas de viento sobre estructuras soporte de captadores solares. En la bibliografía no existe información suficientemente amplia y detallada que permita conocer las cargas más allá de casos simples.

Tampoco ha sido posible encontrar información completa sobre la influencia de diversos parámetros como la existencia de varias filas, el efecto de los vientos laterales, la presencia de otros paneles a los lados o la distribución de fuerzas sobre un panel no aislado del entorno.

En la normativa es posible localizar valores globales, corregidos con coeficientes, que permiten realizar un cálculo aproximado de este tipo de superficies. Pero en ocasiones es necesario disponer de otras metodologías más precisas para poder optimizar el cálculo estructural del soporte, así como conocer con precisión la distribución de cargas en función del ángulo de ataque, separación entre filas, dirección y velocidad del viento, etc.

Ante esta falta de información se ha desarrollado una metodología de simulación numérica que permite obtener toda esta información de detalle. Igualmente se ha realizado una validación de dicha metodología para casos simples con una placa aislada contrastándola con datos de referencia obtenidos de la bibliografía.

### **Conclusiones específicas**

Se han realizado una serie de simulaciones de una instalación fotovoltaica con la finalidad de conocer las acciones del viento sobre ella. Para ello se han estudiado diversos parámetros y factores que pueden tener influencia: velocidad del flujo, dirección del flujo (frontal/cruzado), ángulo de ataque del panel, separación entre filas de paneles, modelado del panel (2D, 3D), etc.

Del siguiente trabajo se pueden extraer, a modo de resumen, las siguientes conclusiones relacionadas con los esfuerzos producidos por el flujo sobre la instalación:

- Con viento frontal, los coeficientes de resistencia dependen en gran medida del ángulo de ataque de los paneles, siendo este el parámetro con mayor influencia.
- Los paneles centrales se comportan de un modo muy similar a paneles bidimensionales. Solo pueden evacuar el flujo incidente por encima o por debajo de ellos. Por el contrario, los paneles externos y cercanos a la orilla soportan más esfuerzos debidos al efecto borde, apareciendo flujos transversales.
- Los paneles situados en la primera fila, por su situación de completa exposición al flujo, soportan los mayores esfuerzos comparativamente con el resto de filas.
- Los paneles de las filas posteriores soportan menores esfuerzos. En ocasiones, estos esfuerzos son en sentido opuesto al flujo incidente inicial debido a una recirculación del aire por las capas inferiores.
- Un cambio en la velocidad del flujo no cambia significativamente el coeficiente de resistencia. La relación fuerzas/velocidad es cuadrática.
- El aumento de la separación entre filas desde los 9 hasta los 12 metros supone una reducción importante de los esfuerzos en la primera fila de paneles en las simulaciones en 2D. En cambio, en simulaciones en 3D no se aprecian diferencias significativas en este aspecto.
- En situaciones de viento cruzado, los esfuerzos en los paneles se reparten de modo asimétrico, teniendo un lado de la instalación mayores cargas que la otra.
- En simulaciones con viento cruzado, los coeficientes de resistencia son mayores al aparecer fuerzas de componente transversal. El reparto de fuerzas a lo largo de la instalación se hace de modo no constante, creando desequilibrios entre paneles. Algunos paneles tienen coeficientes de resistencia mucho mayores que los casos simples con viento frontal- tanto en 2D como en 3D -, mientras que otros paneles los tienen con valores inferiores.

### **7. Líneas de trabajo futuras**

Además de todas las líneas de trabajo enumeradas en el apartado 4.1, casi todas ellas dedicadas al estudio de placas planas, existen líneas de trabajo similares enfocadas al estudio de edificios cúbicos [12] o al efecto de varios de estos edificios dispuestos en conjunto siguiendo diversas distribuciones [13] [14].

Otras líneas de trabajo van enfocadas al estudio térmico de los paneles. En [15] se muestra cómo un caudal de líquido refrigerante variable afecta a la temperatura de las células fotovoltaicas y por tanto a su rendimiento. En [16] se realiza un estudio similar a edificios con doubles fachadas de vidrio y aperturas que permiten el paso del viento entre ellas, impidiendo un sobrecalentamiento del edificio.

en climas cálidos. Un trabajo en esta línea es el de [17] que realiza mediciones de radiación solar y temperatura en la superficie de un colector solar aislado para estimar la cesión de calor al entorno.

Existe un campo muy amplio de trabajo disponible, poco cubierto en la bibliografía, en el estudio de diversas distribuciones de paneles fotovoltaicos, así como en el estudio de la influencia de elementos del entorno sobre ellos (vegetación, edificios, desniveles del terreno, instalaciones urbanas sobre edificios, etc). Casi todo lo encontrado por el autor de este trabajo en la bibliografía va enfocado al estudio individual de un único elemento (panel fotovoltaico o colector solar), la influencia del viento sobre este, y la cesión de calor al entorno. Trabajos como el de [16] pueden trasladarse a instalaciones fotovoltaicas y emplear el propio viento como método de refrigeración. Se hace necesario también el estudio de la cesión de calor al entorno, y cómo la presencia de elementos en las proximidades, así como de otros paneles de la instalación, afectan al flujo, refrigeración y rendimiento de la instalación.

Casi todos los estudios anteriormente mencionados no hacen hincapié en el comportamiento no estacionario del flujo alrededor de estos elementos. Las componentes no estacionarias de algunas variables (presión, velocidad, etc) no son nada despreciables y producen efectos no previstos tales como aumentos en el valor de las fuerzas o fenómenos de vibración no deseados.

## 8. Referencias bibliográficas

- [1] G. Buresti, Bluff-body aerodynamics, Lecture Notes, Department of Aerospace Engineering. University of Pisa, 2000.
- [2] J. Holmes, Wind loading of structures, Taylor & Francis, 2007.
- [3] IHS, ESDU 70015 - Fluids forces and moments on flat plates, 1970.
- [4] S. Hoerner, Fluid-dynamic drag, Sighard F. Hoerner, 1965.
- [5] C. Lindenburg, «Stall Coefficients. Aerodynamic airfoil coefficients at large angles of attack,» de *Annual IEA symposium on the aerodynamics of wind turbines*, 2001.
- [6] S. Bhaduri y L. M. Murphy, Wind Loading on Solar Collectors, Solar Energy Research Institute, Colorado, 1985.
- [7] D. Briassoulis, A. Mistrionis y A. Giannoulis, «Wind forces on porous elevated panels,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 98, pp. 919-928, 2010.
- [8] M. Kasperski, «Specification of the design wind load - A critical review of code concepts,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 97, pp. 335-357, 2009.
- [9] WMO, World Meteorological Organization - Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 2008.
- [10] Norma UNE-EN 1991-1-4.
- [11] J. Pérez García, Determinación de las acciones del viento sobre receptáculos de sistemas de energía fotovoltaica de alta eficiencia. Código 2933/10ITF, Dpto. de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.
- [12] P. Richards y R. Hoxey, «Pressures on a cubi building: Part1. Full-scale results,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011.
- [13] A. Zhang y C. Z. L. Gao, «Numerical Simulation of the wind ield around different building arrangements,» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 93, pp. 891-904, 2005.
- [14] Q. Li, Q. Meng y L. Zhao, «Numerical Research on Pedestrian Wind Environment around Residential Buildings in South China,» de *International Conference on Advances in Energy Engineering*, 2010.
- [15] Z. Chen, S. Furbo, B. Perers, J. Fan y E. Andersen, «Efficiencies of flat plate solar collectors at different flow rates,» *Energy Procedia* 30, pp. 65-72, 2012.
- [16] W. Lou, M. Huang, M. Zhang y N. Lin, «Experimental and zonal modeling for wind presseures on double-skin facades of a tall building,» *Energy and Buildings* 54, pp. 179-191, 2012.
- [17] S. Kumar y S. Mullick, «Wind heat transfer coefficient in solar collectors in outdoor conditions,» *Solar Energy* 84, pp. 956-963, 2010.
- [18] J. Lozano Rodríguez, Proyecto Fin de Carrera: Estimación de las cargas de viento sobre paneles fotovoltaicos mediante simulación numérica, Universidad Politécnica de Cartagena, 2010.
- [19] F. Hsiao y C. Bai, Introduction to CFD Analysis (Fluent & Gambit), National Cheng Kung University, 2007.
- [20] P. Durbin y M. Gorazd, «Fluid Dynamics with a Computational Perspective,» 2007.

